



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

PEKKA ORAVA

INFRAPUNAOPTISEN LINEAARISEN PALOILMAISIMEN TESTAUS-
JA MITTAUSLAITTEISTON SUUNNITTELU JA TOTEUTUS

Diplomityö

Tarkastaja: professori

Seppo Valkealahti

Tarkastaja ja aihe hyväksytty

Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 9. maaliskuu
2011

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

ORAVA, PEKKA: Infrapunaoptisen lineaarisen paloilmaisimen testaus- ja mitauslaitteiston suunnittelu ja toteutus

Diplomityö, 77 sivua, 2 liitesivua

Marraskuu 2011

Pääaine: Sähköverkot ja markkinat

Tarkastaja: professori Seppo Valkealahti

Avainsanat: paloilmaisin, linjailmaisinkaapeli, infrapuna, lämpötilan mittaustaus, testaus

Tämä työ on osa paloturvallisuusosalalla toimivan yrityksen palonilmaisuuun liittyvää tuotekehityshanketta. Tuotekehityshankkeen tavoitteena oli kehittää uudentyyppinen infrapunaoptinen linjailmaisinkaapeli pitkien yhtenäisten tilojen, liikennetunnelien ja teollisuuden kuljetinratojen palonsuojaukseen. Työ keskittyi linjailmaisiprotyypin rakentamiseen sekä sille soveltuvan mittaus- ja testauslaitteiston toteuttamiseen. Ilmaisiprotyypin testaukset tehtiin kolmessa eri mittaussarjassa, jotka sisälsivät neljästä seitsemään erilaista yksittäistä palokoetta. Testausten päähuomio kiinnittyi linjailmaisinkaapelin suojavaippamateriaalien ominaisuuksiin ja erilaisten termisten ja infrapunaoptisten lämpötila-antureiden soveltuvuuteen uudentyyppisessä kaapelirakenteessa. Soveltuvuudet ratkaistiin pääasiassa testaukseen yhdistetyn tiedonkeruujärjestelmän tuottamien mittau tulosten perusteella. Saatujen mittaus- ja testau tulosten on tarkoitus antaa perustietoa linjailmaisimelle soveltuvasta yhdistelmäilmaisusta, sekä helpottaa palamisen eri vaiheisiin liittyvien hälytyskriteerien valintaa. Tulokset olivat lupaavia fluorattujen polymeerien käyttämisestä ilmaisimen suojavaippamateriaalina. Lupaavia tuloksia saatiin myös termisen platinavastusanturin ja optisen termopinoanturin ominaisuuksien yhdistämisestä linjailmaisimen rakenteeseen.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Technology

ORAVA, PEKKA: Design and implementation of an infrared line detector cable testing and measurement system

Master of Science Thesis, 77 pages, 2 Appendix pages

November 2011

Major: Electricity Networks and Market

Examiners: Professor Seppo Valkealahti

Keywords: Fire detector, line detector cable, infrared, temperature measurement, testing

This work is part of a product development project for a company working in the fire safety sector. The aim of the project was to develop an infrared line detector cable for fire safety in continuous spaces, tunnels, and industrial transport tracks. The work concentrated on building a line detector prototype, as well as equipment for measuring and monitoring it. The tests on the prototype detector were done in three steps, which consisted of from four to seven separate fire tests. Particular attention was paid to the material used for the protective sheath on the line detector cable, and on adapting various thermal and infrared temperature sensors for the new types of cable constructions. The adaptations were mainly based on the measurement test results of the combined data acquisition system. The purpose of the test results and measurements was to provide basic information for adapting the detectors to the system and to act as an aid in the selection of alarm criteria for the different stages of combustion. The results were promising for the use of fluoride polymers as a detector material for the protective sheath. Promising results were also obtained for the qualities of thermal platinum resistance sensors and optical thermal sensors being built into the combined detector system.

ALKUSANAT

Kiitän koko Mikropulssi Oy:n henkilökuntaa kaikesta työhöni liittyvästä tuesta ja luotamuksesta. Haluan kiittää työni ohjaajaa Hannu Siivolaa sekä yrityksen tuotekehitysryhmää hyvästä yhteistyöstä. Lisäksi erityiset kiitokset DI Jyrki Saloselle antamastaan asiantuntija-avusta.

Kiitän Sähköenergiatekniikan laitoksen henkilökuntaa laadukkaan opetuksen tarjoamisesta ja lehtori Kirsi Nousiaista hyvistä seminaarien järjestelyistä, sekä yliassistentti Juhani Bastmania työni kommentoinnista. Erityisesti haluan kiittää laitoksen johtajaa professori Seppo Valkealahtea työni tarkastamisesta ja siihen liittyvästä neuvonnasta.

Lempäälässä 28. syyskuuta 2011.

Pekka Orava

SISÄLLYS

1	Johdanto.....	1
2	Termodynamiikka.....	3
2.1	Lämpötila	3
2.2	Lämpöliike	5
2.3	Lämpömäärä.....	6
2.4	Lämmönsiirto	7
2.4.1	Johtuminen.....	7
2.4.2	Säteily	8
2.4.3	Konvektio.....	9
3	Lämpötilan mittaus.....	10
3.1	Lämpötila-anturit.....	10
3.1.1	Vastusanturi	11
3.1.2	Termistori.....	12
3.1.3	Termopari.....	13
3.1.4	Termopino.....	15
4	Pyrometria	18
4.1	Sähkömagnettilinen säteily.....	18
4.2	Infrapunasäteily	20
4.3	Mustan kappaleen säteily	21
4.4	Planckin säteilylaki	22
4.4.1	Wienin ja Rayleigh-Jeansin approksimaatiot	23
4.4.2	Stefan- Boltzmannin laki	25
4.4.3	Wienin siirtymälaki.....	25
4.5	Emissiivisyys.....	27
4.6	Kirchhoffin säteilylaki	28
5	Palonilmaisutekniikka	30
5.1	Paloilmoitin ja palonilmaisujärjestelmät.....	31
5.2	Paloilmaisintyytit	32
5.2.1	Lämpöilmaisimet	32
5.2.2	Savuilmaisimet.....	33
5.2.3	Kaasuilmaisimet.....	35
5.2.4	Liekki-ilmaisimet.....	35
5.3	Infrapunaoptinen palonilmaisuus.....	36
5.4	Monikriteeri- ja yhdistelmäilmaisuus	38
6	Infrapunaoptinen linjailmaisinkaapeli	41
6.1	Linjailmaisinprototyypit.....	42
6.1.1	Terminen linjailmaisinprototyyppi	42
6.1.2	Pyrometrinen linjailmaisinprototyyppi	43
6.2	Linjailmaisimen suojavaippa	44
6.2.1	Suojavaippamateriaalit.....	45

6.2.2	Fluoropolymeerit	45
6.2.3	Fluoropolymeerien spektroskopiaa	46
7	Testaus- ja mittauslaitteisto	48
7.1	Testausympäristö.....	48
7.2	Testausten kohde ja tavoitteet	50
7.3	Testausmenettely	51
7.4	Mittauslaitteisto.....	52
7.4.1	Tiedonkeruukortti	52
7.4.2	Antureiden sijoittelu	53
7.4.3	Mittalähettimet ja kanavaluettelo.....	55
7.5	Mittausohjelmisto.....	56
7.5.1	Labview	57
7.5.2	Datalogger.....	58
8	Mittaustulokset.....	61
8.1	Ensimmäinen mittausarja	62
8.2	Toinen mittausarja	65
8.3	Kolmas mittausarja	67
9	Johtopäätökset.....	72
	Lähteet	74
	Liite 1: Kolmas mittausarja	78
	Liite 2: Testauslomake	79

LYHENTEET JA MERKINNÄT

\vec{B}	Magneettivuon tiheys
$B(T)$	Kokonaissäteilyvoimakkuus
$B_\lambda(T)$	Spektrinen säteilyvoimakkuus aallonpituuden suhteen
$B_\nu(T)$	Spektrinen säteilyvoimakkuus taajuuden suhteen
c_t	Ominaislämpökapasiteetti
c	Valon nopeus
D_λ	Spektrinen radianssi
E	Potentiaaliero, jännite
\vec{E}	Sähkökentän voimakkuus
E_k	Kompensointijännite
$E_\lambda(T)$	Spektrinen säteilyenergiatiheys aallonpituuden suhteen
$E_\nu(T)$	Spektrinen säteilyenergiatiheys taajuuden suhteen
e	Sähkömotorinen voima
h	Planckin vakio
h_m	Materiaalista riippuva lämmönsiirtokerroin
k	Boltzmannin vakio
n	Moolimäärä
p	Paine
Q	Lämpömäärä
ΔQ	Lämpömäärän muutos
q	Lämpövuoto
R	Yleinen kaasuvakio
R_x	Määrittelemätön resistanssi
R_0	Resistanssin arvo vertailulämpötilassa $T = 0\text{ °C}$
R_T	Resistanssin arvo lämpötilassa T
$R_\lambda(T)$	Todellisen kappaleen spektrinen säteilyvoimakkuus
S	Sähkömagneettisen aallon intensiteetti
T	Lämpötila kelvinasteikolla
T_1	Mittauspisteen lämpötila
T_2	Vertailupisteen lämpötila
ΔT	Lämpötilan muutos
dT/dx	Lämpötilagradientti, lämpötilaero
t	Lämpötila celsiusasteikolla
u	Sähkömagneettisen aallon energiatiheys tyhjiössä
V	Tilavuus
V_g	Galvanometrin jännite
V_{REF}	Vertailujännite
α_λ	Absorptiosuhde
α_{ab}	Seebeckin kerroin

ε	Emissiivisyyskerroin
ε_0	Tyhjiön permittiivisyys
ε_λ	Aallonpituudesta riippuva emissiivisyyskerroin
λ	Sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus
λ_{max}	Säteilyenergiatiheyden maksimikohtaa vastaava aallonpituus
μ_0	Tyhjiön permeabiliteetti
ν	Sähkömagneettisen säteilyn taajuus
ρ_λ	Heijastussuhde
σ	Stefan-Bolzmännin vakio
τ_λ	Läpäisysuhde
AI	Analoginen sisääntulo
A/D	Analogia/Digitaali muunnin
Al ₂ O ₃	Safiiri
ASIC	Sovelluskohtainen mikropiiri (engl. Application Specific Integrated Circuit)
ASTM D 2863	Standardi aineen happi-indeksin mittaamiseen
Ch	Mittauskortin kanava (engl. Channel)
D-ilmais	Differentiaali-ilmais, lämpöilmais
DM-ilmais	Differentiaali-maksimaali-ilmais, lämpöilmais
FEP	Fluorieteenipropeni, fluoropolymeeri
Fresnel-linssi	Mikromekaanisesti kuvioitu lyhyen polttovälin linssi
G-kieli	Graafinen ohjelmointikieli
Happi-indeksi	Indeksi määrittää alhaisimman liekehtivää palamista ylläpitävän happipitoisuuden kiinteissä aineissa.
Infrapunaoptinen	Aallonpituusalue, joka käsittää näkyvän valon sekä UV- ja IR-säteilyn alueet
IP 66	Sähkölaitteiden suojausluokka
ITS-90	Kansainvälinen lämpötila-asteikko (engl. International Temperature Scale of 1990)
J-tyyppi	Termopari, jossa on rauta-konstanttaani johtimet
K-tyyppi	Termopari, jossa on kromi-alumiini johtimet
Labview	National Instrumentsin graafinen ohjelmointiympäristö
LOC	Rajahappipitoisuus (engl. Limiting Oxygen Concentration)
LOI	Happi-indeksi (engl. Limiting Oxygen Index)
M-ilmais	Yläraja- eli maksimaali-ilmais
N-heptaani	Palokokeissa käytetty hiilivety, alkaani
NI-DAQ-mx	National Instrumentsin monisäikeistä ohjelma-ajoa tukeva ajuri- ja mittauspalveluohjelmisto
NI-USB-6009	Tietokoneen USB-väylään kytkettävä tiedonkeruukortti
NTC	Termistori (engl. Negative Temperature Coefficient)
PFA	Perfluorialkoksi, fluoropolymeeri
PGA	Säädettävä vahvistin (engl. Programmable Gain Amplifier)

PRONTO	Pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilastointijärjestelmä
PTC	Termistori (engl. Positive Temperature Coefficient)
PTFE	Polytetrafluorieteeni, fluoropolymeeri
T-tyyppi	Termopari, jossa on kupari-nikkeli johtimet
VI	Virtuaali-instrumentti
ZnSe	Sinkkiseleeni

1 JOHDANTO

Suomessa paloilmoittimien kautta hätäkeskuksiin tulevista hälytyksistä yli 95 % on erheellisiä. Erheelliset hälytykset aiheuttavat usein palolta suojattaviin kohteisiin sekä häiriöitä että normaalien toimintojen keskeytymisiä ja pelastusviranomaisille turhia toimenpiteitä. Seurauksena on taloudellisia menetyksiä niin paloilmoittimien omistajille kuin koko yhteiskunnalle. Ongelman syntymekanismiin vaikuttaa pääasiassa ihmisen huolimaton toiminta ja toisaalta paloilmoittimeen liitetyt, häiriöille alttiit paloilmajärjestelmän yksittäiset silmukkomponentit. Koska suojattavana on kuitenkin usein ihmishenkiä tai suojauksella halutaan estää omaisuuden tuhoutuminen tai mahdollinen suuronnettomuuden vaara, on ymmärrettävää että palonilmaisujärjestelmän halutaan reagoivan mieluummin herkästi kuin liian myöhään.

Palonilmaisujärjestelmään kohdistuvan suunnittelun ja tuotekehityksen päätavoitteena on tuottaa ilmaisujärjestelmä, joka havaitsee palon mahdollisimman varhaisessa vaiheessa ja luotettavasti. Näitä ominaisuuksia on kuitenkin käytännössä lähes mahdollonta saada samalla kertaa toteutumaan. Jos järjestelmä reagoi nopeasti, se on usein häiriöille altis. Kun taas halutaan luotettavuutta ja varmuutta, tulee järjestelmästä vastavasti hidas. Palonilmaisujärjestelmän tärkein tehtävä on palonilmaisuus, ja keskeisin yksittäinen silmukkomponentti on paloilmajärjestelmä. Paloilmajärjestelmän kykyä reagoida nopeasti ja luotettavasti halutaan parantaa erilaisten anturityyppien määrän lisäämisellä ilmaisinarakenteeseen. Myös luotettavamman palopäätelyn tekemiseen kehitetään jatkuvasti uusia ohjelmistoja ja tehokkaampia laskenta-algoritmeja. Itse ilmaisuus perustuu kuitenkin edelleen perinteisiin palon tunnussuureisiin kuten lämmön, liekin tai savun havaitsemiseen.

Palon tunnussuureiden havaitsemistapoja ja tekniikoita on kuitenkin paljon, ja suojattavia kohteita on hyvin erilaisia. Tästä syystä paloilmajärjestelmät on olemassa monenlaisia. Ilmaisuus voi perustua erilaisten fysikaalisten ja kemiallisten ilmiöiden makroskooppiseen tai mikroskooppiseen havainnointitapaan. Makroskooppisesti voidaan havainnoida esimerkiksi palamisesta vapautuvaa lämpöenergiaa, ja mikroskooppisesti ilmaisuus voi perustua vaikka liekin tietyllä aallonpituusalueella lähettämään infrapunasäteilyn fotonien käyttäytymiseen. Palamisen vaiheet kytevästä ja savuavasta palosta punahehkuisen ja liekehtivän kautta lopulta hiipuvaan ja sammuvaan paloon sisältävät lähes rajattoman määrän ilmaisinaratkaisuihin soveltuvaa ja erilaisilla antureilla havainnoitavaa informaatiota. Monella eri tapaa lämpöön ja lämpösäteilyyn reagoivien antureiden yhteiskäyttö ja monikriteeristen laskenta-algoritmien yhteen sovittaminen saattavat antaa paloilmajärjestelmälle riittävästi toivottuja ominaisuuksia. Tällainen yhdistelmäilmaisun ja monikriteeritekniikan soveltaminen paloilmajärjestelmään vaatii kui-

tenkin paljon tutkimusta ja tuotekehitystä sekä yksittäisten ilmaisinrakenteiden testausta, ennen kuin tuote voidaan turvatekniikan alalla ottaa käyttöön.

Tämä työ on osa Mikropulssi Oy:n linjailmaisin-tuotekehityshanketta, jonka puitteissa haluttiin kehittää uudentyyppinen infrapunaoptinen lineaarinen paloilmaisinrakenne, joka reagoisi liekehtivään, kytevään ja liikkuvaan paloon, sekä erottaisi ne toisistaan. Tässä työssä keskitytään tällaisen linjailmaisimen prototyypin toteuttamiseen ja sen ominaisuuksien testaamiseen palokokeissa. Testaamiseen liittyvät mittaukset tehtiin kolmessa mittaussarjassa, joista ensimmäiseen mittaussarjaan kuului seitsemän, toiseen neljä ja kolmanteen kolme palokoetta. Palokokeista saatujen mittaustulosten on tarkoitus auttaa yritystä tekemään jatkossa varsinainen tuotekehityspäätös, minkä jälkeen voidaan päättää linjailmaisimen mahdollisesta tuotteistamisesta ja jatkokehityksestä.

2 TERMODYNAMIikka

Termodynamiikka tarkastelee lämpöenergiaan ja lämpötilaan liittyviä ilmiöitä, sekä mekaanisen energian suhdetta niihin. Termodynamiikka eli lämpöoppi on tietyllä tavalla verrattavissa valo-oppiin. Valolla on sekä hiukkas- että aaltoluonne. Lämmöllä on vastaavasti makroskooppinen energialuonne ja mikroskooppinen hiukkasluonne. Makroskooppisella tarkoitetaan suoraan havainnoitavissa olevaa mittakaavaa ja mikroskooppisella aineen hiukkastason atomaarista mittakaavaa.

Fysiikan näkökulmasta lämmön olemus on kuitenkin monimutkainen ja hankala. Lämpöilmiöiden selittäminen vaatii aineen hiukkasluonteen tuntemista, jotta mikrotason kuvailulla voitaisiin antaa selitys havainnoitavalle makrotason ilmiölle, kuten esimerkiksi lämpötilalle. Ei ole mitenkään mahdollista mitata useamman hiukkasen yhtäaikaista sijaintia ja nopeutta ainemäärästä. Lisäksi tällaisen mikroskooppisen systeemin ja mahdollisen mittalaitteen vuorovaikutus aiheuttaisi häiriöitä itse systeemiin ja mittaus tulokset olisivat varsin epäluotettavia. Tästä syystä on välttämätöntä soveltaa tilastollisia menetelmiä ja siirtyä varmuudesta todennäköisyyksiin. Matemaattisilla työkaluilla voidaankin tutkia lämpöön liittyviä makroskooppisia ilmiöitä mikroskooppisista lähtökohdista. [1] Makroskooppisessa maailmassa mittalaite voidaan suunnitella niin herkäksi, että sillä voidaan tutkia haluttua ilmiötä ilman, että mittalaite itse häiritsee tutkittavaa systeemiä. Termodynamiikka onkin makroskooppinen tasapainomalli, jossa systeemin mikroskooppisten osasten rakennetta tai liiketilaa ei tarvitse tuntea muuta kuin tilastollisesti. [2]

2.1 Lämpötila

Lämpötila kuvaa makroskooppisen systeemin ominaisuutta ja tilaa. Lämpötila on makroskooppinen fysikaalinen tilasuure, joten se voidaan havaita vain suurella hiukkasjoukolla, mutta ei yksittäisillä hiukkasilla. Makroskooppisella systeemillä on sisäenergiaa, koska se koostuu suuresta tilastollisesti merkittävästä määrästä hiukkasia, mitkä liikkuvat ja värähtelevät ainemäärässä. Sisäenergialla on termodynamiikassa suora yhteys lämpötilaan. Sisäenergian kasvaessa, lämpötila pyrkii nousemaan ja systeemin epäjärjestys eli entropia samalla kasvaa. Kun lämpötila laskee lähelle absoluuttista nollapistettä, systeemi hakeutuu alimpaan energiatilaansa, ja on usein täysin järjestäytynyt. [3]

Jos tarkastellaan kahta tällaista, aluksi eristettyä ja lämpötiloiltaan erilaista systeemiä A ja B, ja tuodaan ne termiseen kontaktiin toistensa kanssa. Tietyn ajan kuluttua asettuvat niiden makroskooppiset tilamuuttujat kuten lämpötila, paine ja kokonaisenergia uusiin arvoihin. Asettumisajan jälkeen A ja B saavuttavat termisen tasapainon, eli

niillä on samat lämpötilat. Muut tilanmuuttujat sen sijaan voivat saada eri arvoja. Jos systeemi A olisi lisäksi termisessä tasapainossa jonkun kolmannen systeemin C kanssa, on myös B termisessä tasapainossa C:n kanssa. Tämä on termodynamiikan nollas pääsääntö ja tarkoittaa lyhyesti sitä, että jos on olemassa kaksi systeemiä, jotka ovat termisessä tasapainossa kolmannen kanssa, ovat myös termisessä tasapainossa keskenään. [4] Tämä itsestään selvyydeltä vaikuttava pääsäännön tarkoitus on osoittaa, että lämpötila on ominaisuus, joka ei riipu systeemin mikroskooppisista rakenteista. Tämä pääsääntö on välttämätön edellytys lämpötilan mittaamiselle.

Lämpötilan mittaaminen perustuu eri aineiden fysikaalisten ominaisuuksien muuttumiseen lämpötilan funktiona. Lämpötilan lukuarvon esittämiseen tarvitaan kuitenkin vertailu- eli referenssisysteemi, millä voidaan mitata jokin lämpötilasta riippuva fysikaalinen suure. Tällaista referenssisysteemiä sanotaan lämpömittariksi. Lämpömittari mittaa siten omaa lämpötilaa, joka on lämpötasapainossa sama kuin mitattavan kohteen lämpötila. Periaatteessa minkä tahansa tarkasti mitattavissa olevan suureen tunnettua riippuvuutta lämpötilasta voidaan käyttää lämpömittarin lukuarvon määrittämisen lähtökohtana. Tällaisella vertailuperiaatteella tai kokeellisesti määritetystä lämpötilasta käytetään nimeä empiirinen lämpötila. Empiirinen lämpömittari on kuitenkin aina kalibroitava absoluuttisen lämpömittarin avulla, jotta mittaustulokset olisivat vertailukelpoisia muiden lämpömittareiden kanssa. [5]

Absoluuttinen lämpötila-asteikko perustuu absoluuttiseen lämpötilaan, jonka nollakohta on 0 K ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$). Tämä absoluuttinen nollapiste on sekä teoriassa että käytännössä mahdotonta saavuttaa. Se merkitsisi, että mikroskooppiset hiukkaset, kuten molekyylit, ionit ja atomit olisivat täysin pysähtyneet, elektronit alimmilla energioillaan ja kide täysin järjestäytynyt. Absoluuttinen nollapiste voidaan kuitenkin ajatella olevan olemassa, kun mitattuja lämpötila-arvoja interpoloidaan erittäin alhaisissa lämpötiloissa absoluuttisen nollapisteen läheisyydessä. Tästä johtuen lämpötilan kvantifiointi eli lukuarvojen määrittäminen vaatiikin muiden tunnettujen peruspisteiden tarkan määrittämisen, että saadaan yhtenäinen todennettavissa oleva lämpötila-asteikko. Peruspisteiden määrittämiseksi pitää löytää tilanne jossa lämpötila on aina sama. Luontevina peruspisteinä käytetäänkin aineiden olomuotojen tunnettuja muutoslämpötiloja. Celsiusasteikon peruspisteet ovat veden jäätymispiste $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja veden kiehumispiste $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kelvinasteikon peruspisteet ovat absoluuttinen nollapiste lämpötilassa 0 K ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$) ja veden kolmoispiste $273,16\text{ K}$ ($0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Celsiusasteikko on käytössä enimmäkseen arkielämässä osin käytännöllisistä ja osin historiallisista syistä, mutta kelvinasteikko on määritelty sekä termodynaamiseksi että absoluuttiseksi lämpötila-asteikoksi. Lämpötila on yksi SI-järjestelmän seitsemästä perussuureesta ja se on kansainvälisesti määritelty termodynaamisena lämpötilana T , jonka yksikkö on kelvin (K). Termodynaamisen kelvinasteikon yhtenä kiintopisteenä on veden kolmoispiste $273,16\text{ K}$ ($0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$), jonka avulla myös kelvinaste määritellään. Yksi kelvinaste on $1/273,16$ osa absoluuttisen nollapisteen ja veden kolmoispisteen välisestä lämpötilaerosta.

Celsiusasteen ja kelvinasteen yksiköt ovat yhtä suuria, mutta asteikkojen nollapistet eroavat, joten asteikkojen välille saadaan muunnoskaava

$$T = t + 273,15 \text{ K}, \quad (1)$$

missä T on termodynaaminen lämpötila kelvinasteikolla ja t on lämpötila celsiusasteikolla. Absoluuttinen lämpötila-asteikko, johon termodynaaminen lämpötila-asteikko yhtyy, todennetaan ideaalikaasun tilanyhtälöllä. Ideaalikaasulla tarkoitetaan harvaa kaasua, jonka molekyylien tai atomien etäisyydet ja niiden keskimääräiset kineettiset energiat oletetaan niin suuriksi, etteivät molekyylien väliset voimat pääse häiritsemään kaasun molekyylien dynamiikkaa. Ideaalikaasun tilanyhtälö on muotoa

$$pV = nRT. \quad (2)$$

Tilanyhtälössä n tarkoittaa moolimäärää, R on yleinen kaasuvakio ja T on termodynaaminen lämpötila. Yhtälöstä nähdään, että paine p on suoraan verrannollinen lämpötilaan, jos tilavuus V pidetään vakiona. Ideaalikaasua ei todellisuudessa ole olemassa, on vain ominaisuuksiltaan hyvin lähellä sitä olevia kaasuja, kuten typpi, vety tai helium. Tähän ideaalikaasun tilanyhtälöön perustuva lämpötila-asteikon todentaminen voidaan tehdä vain harvoissa erikoislaboratorioissa maailmassa. [6]

Koska absoluuttinen lämpötila olisi perin hankala mitata kaasulämpömittarilla, on käytännön mittauksia varten olemassa kansainvälinen lämpötila-asteikko ITS-90 (engl. International Temperature Scale of 1990). Asteikko perustuu eri aineiden termodynaamisiin kiintopisteisiin, joista yksi on veden kolmoispiste, jonka arvoksi on annettu 273,16 K. Asteikon muutkin kiintopisteet perustuvat erilaisten puhtaiden aineiden faasisimuutoslämpötiloihin, jotka ovat helpohkosti ja tarkasti todennettavissa, ja asteikko on hyvin lähellä absoluuttista lämpötila-asteikkoa. Interpolointi kiintopisteiden välillä tapahtuu lämpötila-alueen mukaan sovitulla lämpötila-antureilla. ITS-90 taulukko ulottuu heliumin höyrynpaineen avulla määritetystä 0,65 K lämpötilasta Planckin säteilylain avulla mitattavissa oleviin yli 961,78 °C lämpötiloihin asti.

2.2 Lämpöliike

Lämpöliikkeellä tarkoitetaan termodynaamisen systeemin mikroskooppisten hiukkasten, kuten atomien, ionien ja molekyylien satunnaista liikettä, joka on yhteydessä systeemin lämpötilaan. Lämpötila kuvaa keskimääräisesti hiukkasten liikkeeseen liittyvää energiaa ja lämpötila on sitä korkeampi mitä voimakkaampaa hiukkasten liike on. Esimerkiksi kaasussa molekyylit etenevät lähes suoraviivaisesti, kunnes törmäävät toisiin molekyyleihin. Nesteessä molekyylit tai ionit etenevät toistensa ohi jatkuvassa vuorovaikutuksessa. Kiinteässä ja kiteisessä aineessa atomit ja molekyylit ovat sidottuja kidehilan paikkoihinsa, mutta värähtelevät tasapainoasemansa ympärillä. Hiukkaset voivat myös

pyöriä massakeskipisteensä ympäri, ja niiden eri osat voivat värähdellä toistensa suhteen. Systeemillä on tästä johtuen sisäenergiaa, mikä koostuu pääasiassa hiukkasten liikkeen kineettisestä energiasta ja värähtelyihin sisältyvästä potentiaalienergiasta. Sisäenergialla tarkoitetaan termodynaamisessa systeemissä lämpöenergiaa, eli kaiken energian summaa mitä systeemi sisältää ilman ulkoista työtä ja lämpöliikkeellä kaikkea hiukkasten liikettä, mitä systeemissä tapahtuu. [7]

Koska jokainen tällainen hiukkanen on vuorovaikutuksessa suuren hiukkasjoukon kanssa, tämä liike on pidemmällä aikavälillä satunnaista, ja yksittäisen mikroskooppisen hiukkasen liiketila vaihtelee tietyn keskiarvon ympäristössä. Klassisella mekaniikalla kuten Newtonin liikeyhtälöllä voitaisiin kuvata täydellisesti vaikka jokaista systeemin hiukkasta. Tämä lähestymistapa lämpöliikkeen kohdalla on silti mahdollinen vain periaatteessa. Jos systeemissä on Avogadron luvun verran eli $6 \cdot 10^{23}$ pistemäistä hiukkasta, olisi vastaavassa liikeyhtälössä $3 \cdot 10^{23}$ muuttujaa. Nämä yksittäisten hiukkasten liikeyhtälöt kytkeytyisivät vielä keskenään osien välisistä vuorovaikutuksista aiheutuvien voimien takia, joten Newtonin liikeyhtälön numeerinen ratkaiseminen olisi mahdotonta. Tästä syystä tarvitaan tilastollisia menetelmiä, joilla systeemin makroskooppiset ominaisuudet pystytään laskemaan tuntematta tarkasti yksittäisten mikroskooppisten hiukkasten liiketilaa. Termodynamiikassa käytetäänkin apuna tilastollista fysiikkaa, joka tutkii suuresta mikroskooppisten hiukkasten määrästä koostuvien makroskooppisten systeemien ominaisuuksia. Tällaisia hiukkasia ovat atomit, molekyylit tai ionit. Tilastollinen fysiikka kuvaa yksittäisten hiukkasten liiketilaa keskimääräisesti ja todennäköisyyksiin perustuen. Olosuhteista riippuen mikroskooppisten hiukkasten liiketiloja ja liiketilan muutoksia on kuvattava kuitenkin joko klassisen mekaniikan tai kvanttimekaniikan lakien mukaisesti. [1, 2]

2.3 Lämpömäärä

Siirtyvää lämpöenergiaa sanotaan lämmöksi tai lämpömääräksi, jos huomioidaan systeemin ominaislämpökapasiteetti ja massa. Lämpömäärää mitataan suureella Q , jonka yksikkö on joule (J). Tietyn ominaislämpökapasiteetin c_t ja massan m omaavan systeemin lämpötilamuutoksen ΔT ja lämpömäärän muutoksen ΔQ välillä on suora yhteys, joka on muotoa

$$\Delta Q = mc_t \Delta T. \quad (3)$$

Jos esimerkiksi systeemiin tuodaan tietty määrä lämpöä, systeemin hiukkasten satunnainen mikroskooppinen liike-energia lisääntyy ja lämpötila nousee. Kun vastaavasti systeemistä siirretään pois tietty määrä lämpöä, sen satunnainen mikroskooppinen liike-energia vähenee ja lämpötila laskee. Jos kaksi lämpötiloiltaan erilaista systeemiä vietään termiseen kontaktiin toistensa kanssa, niin suuremman liike-energian omaavan järjestelmän hiukkaset luovuttavat energiaa kylmemmän järjestelmän hiukkasille. Lämpömäärä kuvaa tätä lämpöenergian siirtymisen määrää. Mitään energiaa kun ei voida

luoda eikä hävittää, ainoastaan siirtää paikasta toiseen tai muuttaa toiseksi energiamuodoksi. Termodynamiikan pohjana onkin kolme kokeellista lakia, jotka tunnetaan lämpöopin kolmena pääsääntönä, edellä esitetyn nollannen pääsäännön lisäksi. Ensimmäinen pääsääntö vahvistaa, että energian muutosprosesseissa systeemin kokonaisenergia säilyy. Toinen pääsääntö osoittaa, että lämpö siirtyy aina kuumemmasta kylmempään päin, lisäten systeemin epäjärjestyksen astetta eli entropiaa. Kolmas pääsääntö olettaa, että jos kaikki hiukkasten liike lakkaa (absoluuttinen nollapiste) niin entropia on nolla, mikä on kuitenkin fysikaalisesti mahdotonta.

2.4 Lämmönsiirto

Termodynamiikassa lämmönsiirto määritellään energiavirraksi, jonka synnyttää lämpötilaero. Lämpöä voi siirtyä spontaanisti, eli ilman ulkoista työtä, kolmella lämmönsiirto-prosessilla: johtumalla, säteilemällä ja konvektoitumalla. Lämmön johtumista voi tapahtua aineen sisällä tai kahden kappaleen välillä, jotka ovat toistensa kanssa kosketuksessa. Siinä lämpö siirtyy atomitason värähtelyinä, kuten esimerkiksi kiinteän metallisen aineen läpi. Säteilylämmönsiirrossa lämpö siirtyy sähkömagneettisena aaltoliikkeenä, erityisesti infrapuna-alueen, näkyvän valon ja ultraviolettialueen aaltona. Säteilylämmönsiirrossa väliainetta ei tarvita, vaan säteily eteneekin parhaiten tyhjiössä. Konvektiossa lämpöä siirtyy virtaavien aineiden (kaasujen ja nesteiden) rajapinnassa tai niiden mukana. Rajapinta voi olla kiinteän ja nesteen välinen, kiinteän ja kaasun välinen tai nesteen ja kaasun välinen. Rajapinnassa lämpö siirtyy molekyylien satunnaisen lämpöliikkeen seurauksena ja kauempana rajapinnasta lämpö siirtyy pääasiassa virtaamalla.

Lämpöä voi siirtyä vain jos kappaleilla tai niiden osilla on lämpötilaero. Lämpö siirtyy lisäksi aina kuumemmasta lämpötilasta kylmempään. Lämpöä voi kuitenkin siirtyä samanaikaisesti kaikilla näillä lämmönsiirtomekanismeilla. Lämpötilaeron ΔT ollessa pieni voidaan monesti olettaa kaikille näille mekanismeille lähes lineaarinen riippuvuus lämpötilaerosta. [8]

2.4.1 Johtuminen

Mikrotasolla lämmön johtuminen selittyy molekyylien kineettisen energian siirtymisellä. Kun esimerkiksi metallipalaa lämmitetään toisesta päästä, on lämmitettävän puolen molekyyleillä suurempi keskimääräinen kineettinen energia kuin vastakkaisen puolen molekyyleillä. Molekyylit ovat vuorovaikutuksessa toisiinsa, joten molekyylien liike siirtyy kuumemmasta päästä kylmempään päähän, eli negatiivisen lämpötilagradientin suuntaan. Molekyylien keskinäisten törmäysten ja ketjureaktioiden seurauksena, koko kappale saavuttaa jonkin ajan kuluttua makroskooppisesti tasaisen lämpötilan. Lämmön johtuminen tapahtuu siten aineen kautta tai läpi, mutta ilman makroskooppisia massavirtoja.

Lämpötilagradientti kuvaa lämpötilan muuttumisen jyrkkyyttä, ja lämpövuoto on suoraan verrannollinen lämpötilagradienttiin ja lämmönjohtavuuteen, joten se voidaan esittää yksiulotteisessa tapauksessa yhtälöllä

$$q = -h_m \frac{dT}{dx}, \quad (4)$$

missä q on lämpövuoto, jonka yksikkö on W/m^2 , h_m on materiaalista riippuva lämmön-siirtokerroin, jonka yksikkö on W/K/m , ja dT/dx on lämpötilagradientti, jonka yksikkösi tulee K/m . Yhtälöä kutsutaan Fourierin laiksi. Yhtälön miinusmerkki johtuu siitä, että lämpö siirtyy alhaisemman lämpötilan suuntaan. Lämmönjohtuminen pyrkii tasoittamaan lämpötilaeroja siirtämällä energiaa, ja syntyvä lämpövuoto on suoraan verrannollinen lämpötilaeroon. Tämän seurauksena lämpötilasta tulee ajasta ja paikasta riippuva, ellei lämpötilaeroja jollakin tavalla pidetä yllä. Esimerkiksi metallit ovat hyviä lämmönjohtimia, sillä niiden elektronit voivat kuljettaa nopeasti energiaa kappaleen sisällä. Lämmönjohtavuudesta onkin suora analogia sähköjohtavuuteen, niin johtimiin kuin eristeisiin.

2.4.2 Säteily

Säteilylämmönsiirrossa lämpöenergia siirtyy sähkömagneettisena säteilynä. Kaikki kappaleet joiden lämpötila on yli absoluuttisen nollapisteen lähettävät sähkömagneettista säteilyä. Säteily poikkeaa muista lämmönsiirtomuodoista siten, ettei se tarvitse mitään väliainetta edetäkseen, vaan siirtyy valon nopeudella tyhjiönkin läpi. Lisäksi säteilyn intensiteetti kasvaa todella jyrkästi korkeilla lämpötilan arvoilla. Säteilylämmönsiirrossa on keskeistä tietää mitkä ja minkälaiset ovat ne pinnat, joiden välillä lämmönsiirto tapahtuu, koska sähkömagneettinen säteily muuttuu lämmöksi vasta ollessaan vuorovaikutuksessa pintojen kanssa.

Hiukkasten lämpöliikkeen seurauksena niiden atomaarisessa rakenteessa tapahtuu jatkuvasti elektronien virittymisiä ylemmille energiatiloille. Elektronin palatessa alempaan energiatilaan hiukkanen voi säteillä eli emittoida sähkömagneettista säteilyä. Tätä hiukkasten lämpöliikkeen tuottamaa sähkömagneettista säteilyä sanotaan lämpösäteilyksi. [9] Kappaleen emittoiman säteilyn voimakkuus on verrannollinen kappaleen lämpötilan neljänteen potenssiin. Kappaleen säteilemä teho pinta-alaa kohti saadaan yhtälöstä

$$B(T) = \varepsilon \sigma T^4, \quad (5)$$

mikä tunnetaan Boltzmanin lakina. Yhtälössä B on kokonaissäteilyvoimakkuus, σ on Stefan-Boltzmannin vakio ($\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$) ja ε on emissiivisyyskerroin ($\varepsilon \in [0, 1]$). Emissiivisyyskerroin ε ilmaisee säteilevän pinnan laadun. Jos kerroin on yksi, kysymyksessä on musta kappale eli täydellinen säteilijä, joka absorboi kaiken siihen

tulevan säteilyn ja emittoi täydellisesti lämpötilaansa verrannollista säteilyä. Emissiivisyyskertoimen ollessa nolla, kappale vastaavasti heijastaa kaiken siihen osuvan säteilyn. Käytännön sovelluksissa emissiivisyys saa aina nollan ja ykkösen välissä olevia arvoja.

2.4.3 Konvektio

Konvektio on lämmönsiirtoa aineiden rajapintojen välillä sekä massavirtauksen mukana. Konvektiossa lämmönsiirto tapahtuu kahden mekanismin välityksellä. Molekyylien satunnaisten liikkeen eli diffuusion lisäksi lämmönsiirtoon vaikuttaa väliaineen virtaus. Lähellä pintaa, missä virtauksen nopeus on lähellä nollaa, difuusio on hallitseva lämmönsiirron mekanismi. Kauempana pinnasta alkaa virtausmekanismi hallita lämmönsiirtoa. Konvektio voi olla joko luonnollista tai pakotettua. Luonnollisessa konvektiossa lämpöä voi siirtyä paikasta toiseen aineen mukana, saman aineen tai eri aineiden tiheyseroista johtuen. Saman aineen tiheyserot johtuvat lämpötilaeroista. [10] Esimerkkejä luonnollisesta konvektiosta on järven tiheän ja raskaamman veden (+4 °C) painuminen pohjalle, tai huoneen kuuman ja kevyemmän ilman nouseminen katon rajaan. Konvektio saadaan aikaan myös pakotetusti, kuten tuomalla ulkoista energiaa pumpulla tai puhaltimella. Konvektiossa syntyvää lämpövuota q voidaan kuvata yhtälöllä

$$q = h_m \Delta T. \quad (6)$$

Tämä on Newtonin laki, ja siinä ΔT on pinnan ja väliaineen välinen lämpötilaero, ja h_m on materiaalin lämmönsiirtokerroin. Lämmönsiirtokerroimelle h_m on käytännössä vaikea löytää oikea arvo. Kertoimeen vaikuttavat esimerkiksi virtaavan aineen viskositeetti, lämmönjohtavuus, ominaislämpökapasiteetti, virtausnopeus, ja se onko virtauksen rajakerros laminaarinen vai turbulenttinen. Virtauksen rajakerroksella tarkoitetaan etäisyyttä tasosta, jossa virtausnopeus saavuttaa vakiintuneen arvonsa. Virtauksen muuttuessa turbulentiksi syntyy virtauskenttään voimakkaita ja epäsäännöllisiä nopeusvaihteluita, jotka kasvattavat lämmönsiirtokerrointa. Perinteisesti lämmönsiirtokerroin määritellään erilaisten empiiristen korrelaatioiden avulla, ja usein joudutaan turvautumaan erilaisiin matemaattisiin malleihin ja approksimaatioihin.

3 LÄMPÖTILAN MITTAUS

Lämpötila on yksi maailman mitatuimmista suureista. Lämpötilalla on ratkaiseva merkitys teknisissä sovelluksissa, ja sillä voidaan hallita monia teollisuuden toimintoja ja prosesseja. Lämpötilan mittaamisen perustana ovat luonnon fysikaaliset ilmiöt, kuten lämpö- ja säteilyenergian vuorovaikutukset. Vuorovaikutukset on tunnettava hyvin, jotta antureiden antamaa mittaussignaalia voidaan tulkita oikein. Lämpötilan mittaamisen tavoitteena on kytkeä jokin lämpötila-arvo lämpötilasta riippuvaan ja mitattavaan suureen. Lähes kaikki luonnon mitattavat fysikaaliset suureet riippuvat enemmän tai vähemmän lämpötilasta. Lämpötilaa voidaankin mitata sen makroskooppisen energialuonteen perusteella termisesti esimerkiksi vastusantureilla, mutta myös sen mikroskooppisen aalto- ja hiukkasluonteen perusteella optisesti, kohteeseen koskettamatta.

Tavallisimmin teollisuudessa käytettyjä lämpötila-antureita ovat edelleen vastusanturit, termoparit ja termopinot. Näiden perustana olevat fysikaaliset ilmiöt esiintyvät myös puolijohteilla, kuten termistoreissa. Sähköisten mittausmenetelmien ja puolijohdeantureiden kehitys mahdollistaa nykyään integroitujen lämpötila-antureiden ja erilaisten mittaustapojen käytön vaikeissakin sovelluskohteissa. Tyypillisimpien lämpötila-antureiden antamia signaaleja on lisäksi helppo tulkita ja tarvittaessa muokata standardisignaaleiksi. Havaittavan mittaussuureen muokkaaminen sähköiseksi standardisignaalliksi on tarpeellista mittaustiedon jatkoprosessointia varten lähes kaikissa mittaussovelluksissa. Huolellisesti suunnitellulla mittausmenetelmällä ja tarkoitukseen sopivilla anturien valinnalla saadaan tarvittaessa hyvinkin tarkkoja mittaustuloksia lämpötilasta tai esimerkiksi sen nousunopeudesta.

3.1 Lämpötila-anturit

Lämpötila-anturi on laite, joka vastaanottaa lämpötilaan verrannollista informaatiota mittaushetkestä. Tuntoelin on anturin osa, jonka jokin fysikaalinen ominaisuus riippuu mitattavasta suureesta. Anturin tuntoelimen tehtävänä on havainnoida erilaisia lämpötilaan liittyviä energiatiloja ja niiden muutoksia, sekä generoida tai muokata niitä kuvaavia signaaleja helposti mitattavaan muotoon. Tuntoelimessä on siten kaikki mahdollinen ja jalostunein havaintoinformaatio, minkä jälkeen uutta arvokasta informaatiota ei enää anturissa synny. Mittausten kannalta olisikin optimaalisinta, jos mitattava suure vaikuttaisi suoraan ja välittömästi anturin tuntoelimeen.

Anturit voidaan jakaa muokkain-, modulaattori- ja generaattorityyppisiin antureihin tai passiivisiin ja aktiivisiin antureihin. Jakamisen perustana molemmissa jaottelutavoissa on anturin tuntoelimen reagointitapa. Passiivisissa antureissa mitattava ilmiö muok-

kaa jotain välillistä sähköistä mittaelimen ominaisuutta, kuten impedanssia, resistanssia, kapasitanssia tai induktanssia. Aktiivisissa antureissa mitattava ilmiö muuntuu jonkin fysiikan ilmiön välityksellä sähköiseksi. Esimerkkinä tästä ovat sähkömagneettinen, valosähköinen, lämpösähköinen ja pyrosähköinen ilmiö.

Anturin tuntoelimen ympärille valmistetaan yleensä sovelluskohteeseen sopiva suo- jakuori, johon voidaan lisäksi liittää monenlaista signaalinmuokkauselektroniikkaa ja esimerkiksi infrapuna-antureissa optisia osia. Tämän vuoksi lämpötilan mittaamiseen soveltuvia anturimalleja on olemassa lähes lukematon määrä, vaikka niiden mittaelimen toiminta perustuisikin samaan fysikaaliseen ilmiöön. Esimerkiksi johteiden ja puolijoh- teiden termisen resistanssin lämpötilariippuvuuteen tai infrapunasäteilyn intensiteettiin perustuvia anturityyppejä on olemassa runsaasti. Riippuen ympäristön ja mittausskohteen vaatimuksista, voidaan eri lämpötila-antureiden tuottama mittaussignaali tarvittaessa muuttaa samaan muotoon, yleensä jännitesignaaliksi. Mittaussignaali muokataan käyt- tökelpaiseen muotoon mittauslähettimellä, joka voi olla erillinen mittausjärjestelmän osa tai anturiin sisäänrakennettu ominaisuus. Mittauslähettimen tuottama signaali on yleensä analoginen jännite- tai virtasignaali, joka muunnetaan lopulta digitaalseksi mit- tauskortin A/D muuntimella. Muunnoksen jälkeen mittautietoa on helpompi käsitellä ja muokata prosessoripohjaisen tiedonkeruulaitteiston ja erilaisten signaalinkäsittelyoh- jelmistojen avulla.

3.1.1 Vastusanturi

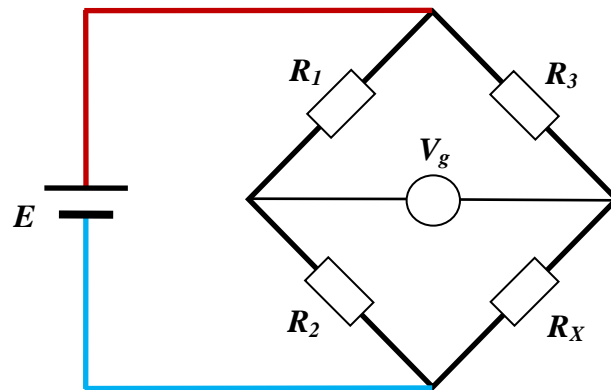
Jos tarvitaan erityisen tarkkaa lämpötilan mittausta, joudutaan yleensä turvautumaan erilaisiin vastusantureihin. Vastusanturin toiminta perustuu yleensä metallien resis- tanssiarvojen lähes lineaariseen riippuvuuteen ympäristön lämpötilasta. Metallien resis- tanssi suurenee lämpötilan kasvaessa. Resistanssi aiheutuu metallin elektronien lämpö- liikkeestä. Lämpöliikkeen vaikutuksesta elektronit törmäilevät ja menettävät osan ener- giastaan aiheuttaen johtavuuden muutoksen metallissa. Johtavuus on riippuvainen elekt- ronien määrästä ja niiden liikkuvuudesta. Resistanssin lämpötilariippuvuus on muotoa

$$R_T = R_0 + R_0 \alpha \left[T - \gamma \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T}{100} \right) - \beta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T^3}{100} \right) \right], \quad (7)$$

missä R_0 on resistanssi referenssilämpötilassa $T = 0 \text{ °C}$ ja α , β , γ ovat resistanssin läm- pötilakertoimia. Vastusanturi on modulaattorityyppinen anturi, koska se moduloi läm- pötilan lukuarvon mitattavaksi resistanssiarvoksi. Vastusanturimittaus vaatii ulkoisen jännitelähteen, ja vastusarvo mitataan yleensä käyttämällä Wheatstonen siltakytkentää. Siltakytkennästä on esitetty piirikaavio kuvassa 1. [11]

Wheatstonen silta on kaksiahaarainen piiri, jonka kummassakin haarassa on kaksi vastusta. Toisen haaran vastuksista toinen on tuntematon, ja sen resistanssi voidaan määrittää tunnettujen vastusten resistansseista, kun ne on määritelty niin, että piirin haa- rojen välillä ei kulje virtaa. Kuvassa 1 näkyvä R_x on tuntematon resistanssi, joka halu-

taan määrittää. Tunnettuja resistansseja ovat R_1 , R_2 ja R_3 , ja resistanssin R_2 arvoa voidaan säätää. Arvoa säädetään, kunnes piirin haarojen välillä ei ole enää jännite-eroa, ja niiden välillä ei kulje virtaa. Piirin haarojen välinen nollavirta voidaan todeta käyttämällä herkkää galvanometriä (V_g).



Kuva 1. Wheatstonen siltakytcentä.

Lämpötila-antureiden vastusmateriaaleina käytetään yleensä puhtaana saatavia metalleja, kuten platinaa, nikkeliä, kuparia, alumiinia tai hopeaa. Ylivoimaisesti yleisin on platinavastusanturi Pt 100. Nimi tulee siitä, että anturin resistanssi $0\text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa on $100\text{ }\Omega$. Tässä työssä on käytetty Pt 1000 anturia, jonka resistanssi on $0\text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa vastaavasti $1000\text{ }\Omega$. Platinavastusanturi on tunnetusti hyvin lineaarinen ja stabiili, ja sen sopiva käyttöalue on noin $-260\text{ }^{\circ}\text{C} - 850\text{ }^{\circ}\text{C}$. Platinavastusantureita on sekä lanka-antureina että kalvoantureina.

3.1.2 Termistori

Termistorit ovat puolijohdetyyppisiä vastusantureita. Niiden herkkyys on lähes kymmenen kertaa parempi kuin metallivastusantureilla. Termistorien stabiilisuus on kohtuullisen hyvä pitkälläkin aikavälillä, mutta niiden huonona puolena on suuri epälineaarisuus. Termistorit valmistetaan yleensä monikiteisistä oksidiseoksista. Riippuen siitä onko ympäröivä kaasu valmistusvaiheessa hapettava vai pelkistävä tulee materiaalista negatiivisen tai positiivisen lämpötilakertoimen omaava. NTC-termistorilla (engl. Negative Temperature Coefficient) on negatiivinen lämpötilakerroin, eli vastusarvo pienenee lämpötilan kasvaessa. NTC-termistorin resistanssin lämpötilariippuvuus on muotoa

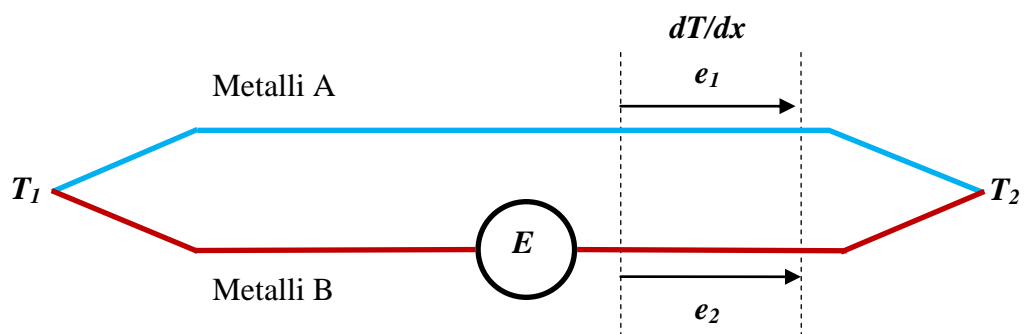
$$R = R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}, \quad (8)$$

missä R_0 on referenssilämpötilan resistanssi, β on termistorin materiaaliveko, T on absoluuttinen lämpötila ja T_0 referenssilämpötila. Useimmiten vain NTC-tyyppistä termis-

toria käytetään lämpötilan mittaamiseen. PTC-termistorilla (engl. Positive Temperature Coefficient) on vastaavasti positiivinen lämpötilakerroin, joten lämpötilan noustessa anturin vastusarvo suurenee. PTC-tyyppisiä antureita käytetään useimmiten vain bi-nääri-ilmaisimina halutuille lämpötila-arvoille. Puolijohteista valmistettujen lämpötila-antureiden etuna on niiden pieni koko ja suuri resistanssin lämpötilakerroin. Suuresta lämpötilakertoimesta johtuen termistorit ovat vastusantureita herkempiä lämpötilamuutoksille. Haittapuolena epälineaarisuuden ja heikon stabiilisuuden lisäksi on kapea mittaustalue, mikä on noin $-80\text{ °C} - 250\text{ °C}$.

3.1.3 Termopari

Termopari eli termoelementti on laajasti käytössä oleva anturityyppi lämpötilan mitta-uksissa. Moneen sovellutukseen sen yksinkertaisuus ja luotettavuus sekä halpa hinta ovat kilpailukykyisiä ominaisuuksia. Varsinkin laajalla lämpötila-alueella termoparien käyttö on vastusantureita yleisempää. Termopareja löytyy ominaisuuksiltaan ja rakenteeltaan monenlaisia. Termopari valmistetaan yleensä kahdesta eri metallia olevasta langasta, jotka on toisesta päästä hitsattu yhteen (kuva 2). [12] Termoparit jaetaan eri tyyppeihin riippuen siitä mitä kahta eri metallia sen valmistukseen on käytetty. Yleisimmät tyypit ovat K-tyyppi (kromi-alumiini), J-tyyppi (rauta-konstanttaani) ja T-tyyppi (kupari-konstanttaani). Koska termoelementti on aktiivinen generaattori tyyppinen anturi, sitä voidaan joissakin sovelluksissa käyttää vaikka ilman virtalähdettä. Termoparien liitoksista voidaan tehdä hyvin pieniä, minkä takia niiden lämpötilavaste on nopea. Merkittävin rajoittava tekijä on sen tarkkuus, mikä johtuu suhteellisen heikosta signaalista ja epälineaarisuudesta. Esimerkiksi K-tyypin termopari generoi jännitteen 4,1 mV, joka vastaa 100 °C lämpötilaa. Termopari ei mittaa absoluuttista lämpötilaa vaan lämpötilaeroa, joten mittauksissa tarvitaan myös referenssilämpötila.



Kuva 2. Termopari eli termoelementti.

Kuvassa 2 on esitelty termoparin toiminnallinen rakenne. Termopari koostuu kahdesta eri metallia olevasta langasta A ja B, jotka on liitetty molemmista päistä yhteen. Liitosta T_1 sanotaan mittauspisteeksi tai -liitokseksi, koska se asetetaan mittaamaan kohteen lämpötilaa ja liitosta T_2 vertailupisteeksi tai -liitokseksi, koska se asetetaan mittaamaan

referenssilämpötilaa. Termopari kokonaisuudessaan mittaa näiden kahden pisteen välis-
tä lämpötilaeroa.

Termoparissa olevaa mittaussuutusta T_1 lämmitettäessä elektronit saavat liike-
energiaa ja alkavat hajaantua kohti kylmempää vertailusuutusta T_2 . Vertailusuutuksen puo-
lelta ajautuu myös elektroneja mittaussuutuksen puolelle, mutta mittaussuutuksen elektro-
nien suuremman liike-energian takia enemmän elektroneja ajautuu diffuusion vaikutuk-
sesta vertailusuutuksen puolelle. Tämä aiheuttaa epätasapainon johtimien elektronija-
kaumiin, minkä vuoksi molempiin johtimiin generoituu erisuuruiset sähkömotoriset
voimat eli termojännitteet e_1 ja e_2 . [4] Termojännitteet syntyvät suutuspisteiden välillä
lämpötilagradientin dT/dx kohdalle. Tapahtumaa kutsutaan termosähköiseksi ilmiöksi
tai Seebeckin ilmiöksi. Johtimien ollessa eri materiaaleja on niiden termojännitteiden
potentiaaliero E mitattavissa. Potentiaalieron E suuruusluokka on noin $10 \mu\text{V/K} - 100$
 $\mu\text{V/K}$ riippuen metallien A ja B valinnoista. Termopareilla voidaan mitata $20 \text{ K} - 2400$
 K lämpötiloja. [6] Mittauspisteen lämpötilan T_1 ja vertailuspisteen lämpötilan T_2 välillä
pätee yhtälö

$$E = \alpha_{ab} (T_1 - T_2) = \alpha_{ab} \Delta T. \quad (9)$$

Kun lämpötilaero ΔT vertailu- ja mittauspisteen välillä on pieni, on syntyvä potentiaa-
liero E verrannollinen siihen. Lämpötilaeron kasvu suutuspisteissä aiheuttaa epälineaari-
suutta, mikä on otettava huomioon mittaussovelluksissa. Ilmiö on epälineaarisuuden
lisäksi myös materiaalienkohtainen. Kerroin $\alpha_{ab} = \alpha_b - \alpha_a$ on materiaaleista riippuva
Seebeckin kerroin, joka kuvaa lämpötilaherkkyttä. Metalleilla ja puolijohteilla on hy-
vin erilaiset Seebeckin kertoimet. Puolijohteiden kertoimet ovat hyvin suuria metallei-
hin verrattuna.

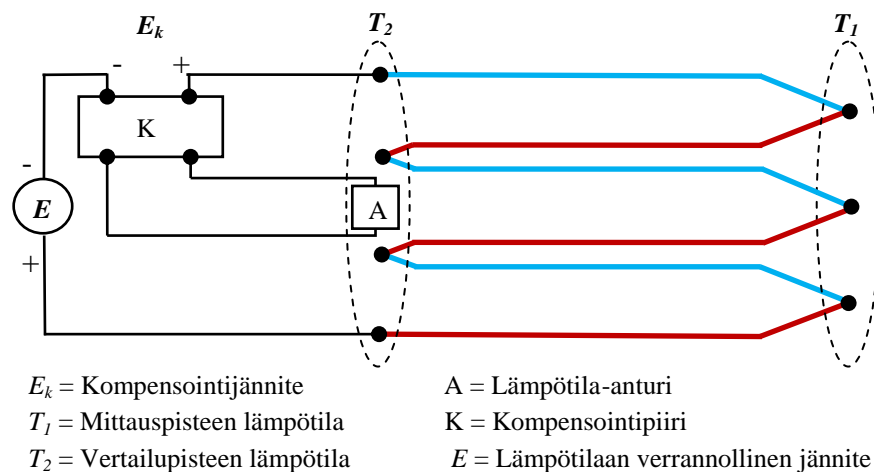
Termoparissa käytetään yleensä johdinmateriaaleina metalleja, koska ne kestävät
hyvin korkeita lämpötiloja. Metalleissa on paljon vapaita elektroneja, jotka saavat ai-
kaan kohtuullisen hyvän termojännitteen. Termojännitteet syntyvät vaikka johtimet oli-
sivat samaakin materiaalia, mutta kun jännitteet lasketaan yhteen, ne kumoaisivat toi-
sensa. Tämä johtuu siitä, että varauksenkuljettajien epätasapainosta aiheutuva termojän-
nite syntyy ainoastaan lämpötilagradientin dT/dx kohdalle johtimeen, eikä termoparin
mittausliitokseen. Termosähköisen ilmiön suuruus on myös riippuvainen aineiden elekt-
ronirakenteesta ja elektronien sirontaprosesseista, joiden teoriaa ei toistaiseksi täysin
hallita. Tästä syystä termosähköiseen ilmiöön liittyvien kokeiden ja teorian välillä esiin-
tyy myös poikkeavuutta [6].

Käytännön mittauksissa vertailupistettä ei yleensä pystytä tuomaan mittauspisteen
viereen, vaan välillä täytyy asentaa pidennysjohdot. Jos pidennysjohdot ovat eri materi-
aaleja kuin termoparissa käytettävät johtimet, mitattavaan jännitteeseen tulee huomatta-
vasti virhettä. Virheellinen termojännite täytyykin kompensoida johtojen suutuspisteissä.
Pidennysjohtimien ja liittimien ollessa samoja homogeenisiä materiaaleja kuin termopa-
rijohtimet, ei virhettä synny, koska ylimääräisiä termojännitteitä ei pääse syntymään
johtimien matkalle. Kun vertailupiste on $0 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa, standardit ilmoittavat ter-

moparin tuottaman jännitteen. Tavallisimmille termoparimateriaaleille lämpötila- ja jännitearvot on taulukoitu juuri tuossa vertailupisteen lämpötilassa. Jos vertailupisteen lämpötila ei ole 0 °C, täytyy mitattuun jännitteeseen tehdä korjaus vertailuliitoksen lämpötilan kompensoinnilla eli kylmäpistekompensoinnilla. Korjaus tehdään nimenomaan mitatuille jännitteille, ei lämpötiloille, koska eri materiaaleille taulukoitujen Seebeck-kertoimien lämpötilariippuvuus ei ole lineaarista. Useimmissa mittalaitteissa ja mittalähettimissä käytetäänkin analogista tai digitaalista kompensointi- ja mittausjännitteen lineaarisointimenetelmää. Yleensä termopariin perustuvissa mittaussovelluksissa on vertailupisteen lämpötilan kompensointi mittalähettimessä, jossa liitospisteen lämpötilaa mitataan termistorilla, diodilla tai Pt 100 vastusanturilla. Pienillä alle 50 °C lämpötilaeroilla tulee vertailupisteen lämpötilan mittauksen tarkkuus kuitenkin määräväksi tekijäksi mittaustuloksessa.

3.1.4 Termopino

Useamman termoelementin sarjaankytkennästä käytetään nimitystä termopatsas tai termopino. Kuvan 3 kytkennästä nähdään, miten yksittäisten termoelementtien mittausliitokset muodostavat yhteisen mittauspisteen T_1 ja vertailuliitokset yhteisen vertailupisteen T_2 . Jokaisen termopinoon kuuluvan termoelementin generoima jännite summautuu yhteen, ja summajännitteen suuruus riippuu sarjaankytkettyjen termoelementtien määrästä. Tämä mahdollistaa pienempien lämpötilamuutosten mittaamisen, joten se on herkempi kuin yksittäinen termopari.

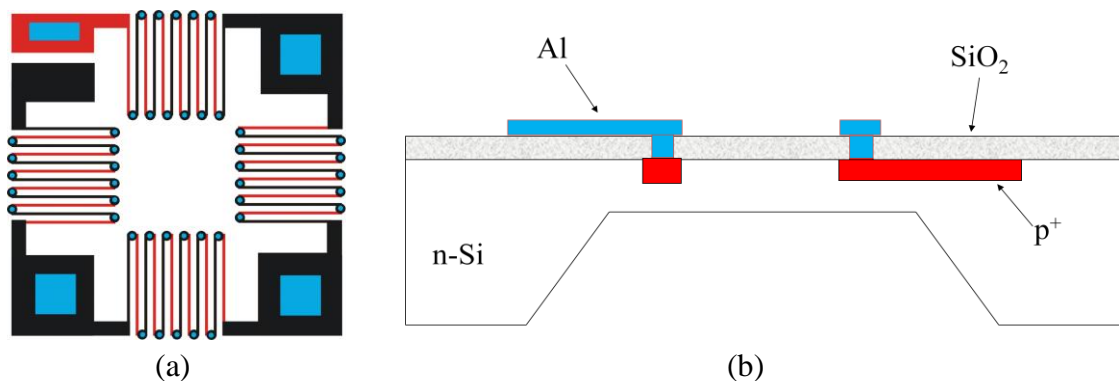


Kuva 3. Kolmen termoelementin muodostama termopino ja kompensointipiiri.

Termopinossa mittauspisteen lämpötilaan T_1 verrannollinen jännite E muodostuu yksittäisten termoelementtien generoimien termojännitteiden summasta sekä vertailupisteen lämpötilaan T_2 verrannollisesta kompensointijännitteestä E_k . Kompensointijännitteen E_k suuruus riippuu lämpötila-anturin A mittaamasta vertailupisteen T_2 lämpötilaa vastaavasta termojännitteestä. Kompensointi tehdään jännitetasolla, koska lämpötilan jännite-

riippuvuus ei ole lineaarista. Yleensä kompensointipiiri on antureissa sisäänrakennettu, ja vertailupisteen lämpötilaa mitataan pienikokoisilla ja herkillä puolijohdeantureilla, kuten termistoreilla. Tätä kompensointipiirin toimintoa sanotaan myös kylmäpistekompensoinniksi. Kylmäpistekompensoinnissa vertailulämpötilaan verrannollinen kompensointijännite voidaan huomioida joko sähköisesti tai ohjelmallisesti mittaustulokseen. Tämä kompensoinnin jännitekorjaus lisätään yleensä siltakytkennän avulla termojännitteeseen. [12]

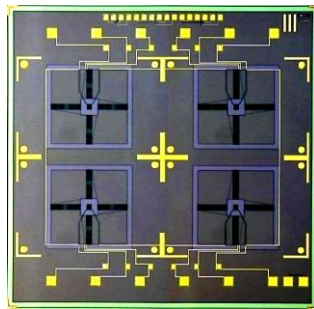
Metalleihin verrattuna termosähköinen ilmiö on puolijohdeilla voimakkaampi. Nykyään, modernin puolijohdeteknologian massavalmistuksessa, on mahdollista tuottaa piialustalle termopino, joka koostuu sadoista sarjaan kytketyistä termoelementeistä yhden neliömillimetrin alueella. Tällainen mikrotermopino soveltuu hyvin infrapunasäteilyn optiseen mittaamiseen. Kuvassa 4 (a) on mikrotermopino, joka sisältää 24 yksittäistä sarjaan kytkettyä termoelementtiä. Tällaisen termopinon valmistuksessa käytetään hyväksi mikromekaanisia työstömenetelmiä, joilla voidaan piialustalle valmistaa kalvoja, siltoja, palkkeja sekä erilaisia uria, reikiä ja kuoppia. Piitä ei käytetä mikrotermopinoissa pelkästään nykyisestä tehokkaasta puolijohdeteollisuudesta johtuen, vaan siksi, että piillä on erittäin hyvät mekaaniset, termiset ja infrapuna-alueen optiset ominaisuudet. [13]



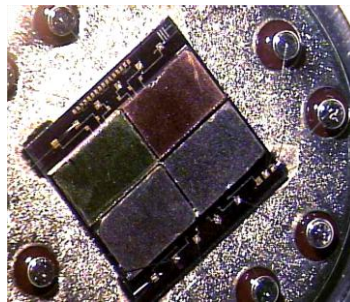
Kuva 4. Piialustalle valmistettu Si-Al mikrotermopinoanturi. a) Termopino-osio, jossa 24 termoelementtiä on kytketty sarjaan. b) Poikkileikkauskuva anturin rakenteesta. [14]

Kuvassa 4 (b) näkyy poikkileikkauskuva mikrotermopinon rakenteesta ja materiaaleista. Piialustaan on tehty kapeita p-tyypin alueita n-tyypin epitaksiaalikerrokselle käyttämällä ioni-istutusta tai diffuusiota. P-tyypin alueet on yhdistetty alumiiniliuskoilla toisiinsa, ja on saatu 24 kappaleen Si-Al termoelementin muodostama mikrotermopino-osio. [14, 15] Valmistamalla tällaisia mikrotermopino-osioita useampia yhdelle piialustalle, saadaan kuvassa 5 (a) näkyvä symmetrinen kaksi kertaa kaksi termopinomatriisi. Termopinomatriisi on alustana valmistettaessa kuvassa 5 (c) näkyvä integroitu 4-kanavainen infrapuna-anturi. Kuvassa 5 (a) näkyvä yksittäinen tumma ristinmuotoinen termopino-osio saattaa sisältää satoja Si-Al termoelementtejä sarjaan kytkettynä. Termopino-osion keskellä näkyvä neliö on termopinon mittaustiili, joka päällystetään hyvin infrapunasäteilyä absorboivalla materiaalilla. Absorboivan materiaalin tarkoitus on reagoida termisesti infrapunasäteilyn intensiteettiin ja vaikuttaa sitä kautta termopinosta mitatta-

vaan termojännitteeseen. Neliön keskipisteessä näkyy lisäksi pieni musta piste, joka on lämmitysvastus anturin itsetestausta varten. Kuvassa 5 (b) on termopino-osioiden päälle kiinnitetty kanavakohtaiset suodatinelementit, joiden tarkoituksena on päästää halutut infrapunasäteilyn aallonpituuskaistat termopinomatriisille. Matriisi on liimattu anturin runko-osaan ja kuvassa näkyvien bondauslankojen avulla kytketty anturin jalkojen päissä oleviin nystyihin. Anturimatriisin yläreunassa näkyy liitoskohta ASIC-piiriä (engl. Application Specific Integrated Circuit) varten, jossa voidaan suorittaa mittaussignaalin muokkausta. Kuvasta 5 (c) nähdään valmis neljällä eri mittauskanavalla varustettu integroitu mikrotermopinoanturi. Kuvassa näkyy myös anturin suojakotelot ja suojalinssit. Suojalinssin muotoilulla voidaan vaikuttaa anturin optisiin ominaisuuksiin, kuten polttoväliin ja vastaanotettavan infrapunasäteilyn keilan leveyteen ja aallonpituusalueeseen. Linssinä käytetään usein kevytrakenteista ja mikromekaanisesti työstettyä infrapunasäteilyä kokoavaa Fresnel-linssiä. Fresnel-linssin kuviointi mahdollistaa lyhyen polttovälin anturin optiikalle ilman massan liiallista kasvua. [16]



(a)



(b)



(c)

Kuva 5. Integroitu 4-kanavainen mikrotermopinoanturi. a) Piialusta, jossa 4-osiainen termopinoanturimatriisi. b) Termopino-osioiden infrapuna-alueen suodatinelementit. c) Termopinoanturin kotelo ja suojalinssi.

Suojalinssin materiaali valitaan mitattavan infrapunasäteilyn aallonpituusalueen mukaan. Linssin on oltava infrapunaoptisesti läpinäkyvä niille säteilyn aallonpituuksille joita halutaan mitata. Lyhyillä aallonpituuksilla ($1\ \mu\text{m} - 4\ \mu\text{m}$) voidaan käyttää esimerkiksi safiirilinssiä (Al_2O_3) ja pidemmillä aallonpituuksilla ($2\ \mu\text{m} - 14\ \mu\text{m}$) sinkkiseleenistä (ZnSe) valmistettuja linssejä.

4 PYROMETRIA

Lämpösäteilyn mittaaminen eli pyrometria on mittaustekniikka, jossa kohteen lämpötilaa mitataan kohdetta koskettamatta, käyttäen hyväksi kohteen pinnasta säteilevää energiaa. Tämä lämpösäteilyyn perustuva mittaustekniikka mahdollistaa lämpötilamittaukset kohteista, joihin tavanomaisten vastusanturien, termistorien ja termoelementtien aseneminen on joko mahdotonta tai erittäin hankalaa. Tällaisia ovat hyvin korkeat lämpötilat, liikkuvat, räjähdysvaaralliset ja etäällä olevat kohteet tai nopeasti muuttuvat lämpötilat. Kaupallisesti valmistetuilla pyrometreillä voidaan mitata lämpötiloja alkaen -50 °C ja päättyen $+3000\text{ °C}$. Pyrometrin toiminta perustuu sähkömagneettiseen säteilyyn ja sitä kautta mustan kappaleen säteilykäsitteeseen ja Planckin säteilylakiin, joten siihen liittyy paljon teoriaa. Pyrometriassa käytetäänkin eksplisiittisiä yhtälöitä yhdistämään termodynaaminen lämpötila ja mitattava suure, joka tässä tapauksessa on spektrinen säteilyvoimakkuus. Luotettavan mittaustuloksen saavuttamiseksi, täytyy lisäksi tuntea hyvin pyrometrien toiminta ja niiden optiset ratkaisut, sekä mitattavan kohteen säteilyominaisuudet kuten pinnan emissiivisyys. Jos tutkittavan pinnan ja mittaavan pyrometrin välillä ei huomioida esimerkiksi väliainetta ja häiritseviä säteilylähteitä tai käytetään väärän tyyppistä pyrometriä, voi mittaustulos olla hyvinkin epäluotettava. [12]

4.1 Sähkömagneettinen säteily

Sähkömagneettisen teorian mukaan muuttuva magneettikenttä toimii sähkökentän lähteenä, ja vastaavasti muuttuva sähkökenttä toimii magneettikentän lähteenä. Nämä kentät synnyttävät ja ylläpitävät toisiaan muodostaen sähkömagneettisen kentän, joka etenee avaruudessa sähkömagneettisena aaltona (Kuva 6). Tyhjiössä etenevän sähkömagneettisen aallon energiatiheyttä u , jonka yksikkö on J/m^2 , kuvataan yhtälöllä

$$u = \frac{1}{2} \epsilon_0 \vec{E}^2 + \frac{1}{2\mu_0} \vec{B}^2, \quad (10)$$

missä ϵ_0 on tyhjiön permittiivisyys, μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti, \vec{E} on sähkökentän voimakkuus, ja \vec{B} on magneettivuon tiheys. Kun sijoitetaan sähkömagneettiseen aaltoon liittyvä magneettivuontiheyden yhtälö

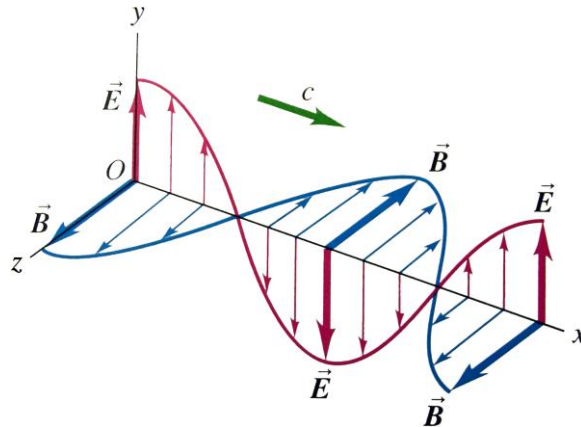
$$\vec{B} = \frac{\vec{E}}{c} = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \vec{E}, \quad (11)$$

edellä olevaan sähkömagneettisen aallon energiatiheyden yhtälöön (10), saadaan aallon

energiatiheyden yhtälöksi

$$u = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \vec{E}^2 + \frac{1}{2} \varepsilon_0 \vec{E}^2 = \varepsilon_0 \vec{E}^2 = \frac{1}{\mu_0} \vec{B}^2. \quad (12)$$

Tämä tulos osoittaa, että tyhjiössä etenevän sähkömagneettisen aallon energiatiheys jakautuu tasan sähkökentän ja magneettikentän kesken.



Kuva 6. Sähkö- ja magneettikentät ovat kohtisuorassa toisiaan ja sähkömagneettisen aallon kulkusuuntaa vastaan. \vec{E} on sähkökentän voimakkuus, \vec{B} on magneettivuon tiheys ja c on valon nopeus. [2]

Teho millä sähkömagneettinen aalto kuljettaa energiaa, saadaan selville kertomalla energiatiheys aallon etenemisnopeudella. Sijoituksen jälkeen saadaan tulokseksi aallon intensiteetin S yhtälö, joka on muotoa

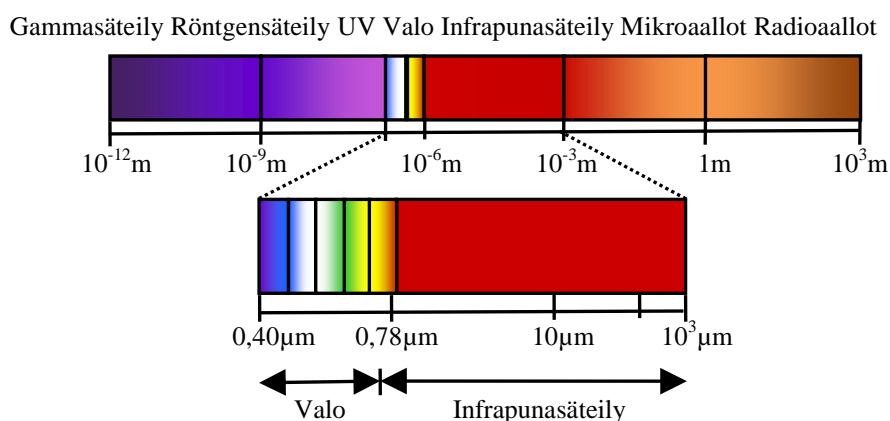
$$S = uc = \varepsilon_0 c \vec{E}^2 = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \vec{E}^2 = \frac{\vec{E} \vec{B}}{\mu_0}. \quad (13)$$

Saatu tulos kuvaa sähkömagneettisen aallon tehoa pinta-alayksikköä kohti ja yksiköksi saadaan W/m^2 . Ratkaisulle on esitetty edellä kolme vaihtoehtoista esitystapaa. [2] Sähkömagneettisen säteilyn etenemisnopeus tyhjiössä ja melko tarkasti myös ilmassa on valonnopeus c eli $3 \cdot 10^8$ m/s. Lisäksi etenemisnopeuden, aaltoliikkeen taajuuden ν ja aallonpituuden λ kesken pätee aaltoyhtälö $c = \nu \cdot \lambda$.

Sähkömagneettisen säteilyn esittäminen pelkästään aaltona ei kuitenkaan usein riitä, vaan säteily on ajateltava energiahiukkasina eli kvantteina. Tämä sähkömagneettisen säteilyn aaltoluonne ja energian kvanttittuminen pystyttiin yhdistämään yhdeksi teoriaksi jo 1930-luvulla kvantti-elektrodynamiikassa. Teorian mukaan kaikki olemassa olevat kappaleet lähettävät sähkömagneettisen säteilyn kvantteja, joita syntyy materiaalien mikroskooppisten hiukkasten, kuten atomien, ionien ja molekyylien liiketilan muutosten seurauksena. Kvanteilla on säteilyn aallonpituudesta riippuen tietty energia ja liikemäärä, minkä johdosta sähkömagneettisen säteilyn energiaa voidaan vastaanottaa tai lähet-

tää ainoastaan tietyn kokoisina energiapaketteina. Näitä sähkömagneettisen säteilyn energiapaketteja nimitetään myös fotoneiksi. Käytännössä säteilyn esitystapa, joko aaltolina tai fotoneina, valitaan kulloisenkin ongelman mukaan. Aaltoluonne on käyttökelpoinen, kun tarkastellaan säteilyn etenemistä ja käyttäytymistä aineen rajapinnoilla, tai kun tutkitaan erilaisia interferenssi- ja diffraktioilmiöitä. Fotoni on kätevämpi esitystapa silloin, kun tarkastellaan säteilyn ja materian vuorovaikutuksia esimerkiksi absorptiossa ja emissiossa. Sähkömagneettinen säteily etenee siis aaltolina, mutta joissakin tapauksissa, kuten syntyessään ja kadotessaan, käyttäytyy kuitenkin hiukkasten tavoin.

Sähkömagneettisen säteilyn jaottelua aallonpituuden eli fotonien energian mukaan kutsutaan sähkömagneettisen säteilyn spektriä. Spektrin kirjo ulottuu radioaaltojen useiden kilometrien aallonpituuksista aina muutamien pikometrien gammasäteilyn aallonpituuksiin asti. Spektri jaetaan yleensä seitsemään nimettyyn osa-alueeseen eli kais- taan. Kuva 7 esittää sähkömagneettisen säteilyn spektrin ja eri aallonpituuskaistat.



Kuva 7. Sähkömagneettisen säteilyn spektri. [17]

Kuvasta 7 voidaan nähdä, että silmä näkee valona vain hyvin suppean kaistan sähkömagneettisen säteilyn spektristä, eli aallonpituudet $0,4\ \mu\text{m}$ – $0,78\ \mu\text{m}$. Tämän näkyvän valon kaistan molemmiin puoliin sijaitsevat lyhyiden aallonpituuksien puolella ultra-violettsäteilyn kaista, joka on $0,1\ \mu\text{m}$ – $0,4\ \mu\text{m}$. Pidempien aallonpituuksien puolella sijaitsee lämpö- eli infrapunasäteilynkaista, joka on $0,8\ \mu\text{m}$ – $1000\ \mu\text{m}$. Infrapunasäteilyn kaista voidaan vielä jakaa lähi-, keski- ja kaukoinfrapunasäteilyn kaistoiksi. Sähkömagneettisesta säteilystä käytetään eri nimiä eri aallonpituusalueilla, koska eri aallonpituuksilla on ratkaisevasti erilaiset vuorovaikutusmekanismat aineen kanssa.

4.2 Infrapunasäteily

Lämpösäteilyksi eli infrapunasäteilyksi kutsutaan kaistaa sähkömagneettisen säteilyn spektristä, joka ulottuu noin yhdestä mikrometristä yhteen millimetriin. Infrapunasäteilyn aallonpituus alkaa siitä mihin näkyvän valon aallonpituus loppuu, joten sitä ei näe paljaalla silmällä. Tästä syystä säteilyä sanotaan infrapunasäteilyksi. Sähkömagneettisen säteilyn spektri jaetaan usein tällä tavalla, joskus jopa mielivaltaisestikin, aallonpituus-

alueensa mukaisiin kaistoihin. Sähkömagneettisen säteilyn kaistat erotetaan ja nimetään niiden tapojen perusteella, joilla kyseistä säteilyä voidaan tuottaa tai havaita. Eri spektrikaistoilla oleva säteily on periaatteessa samanlaista. Säteily etenee aina valonnopeudella ja säteilyyn liittyvät teoriat ja optiikan lait koskevat kaikkia kaistoja, joten niitä erottaa ainoastaan aallonpituus.

Sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus riippuu säteilyn syntytavasta. Infrapunasäteilyä syntyy atomien ja molekyylien värähtelyistä eli mikroskooppisten hiukkas-ten lämpöliikkeen seurauksena, ja säteilyn voimakkuus on verrannollinen kappaleen termodynaamiseen lämpötilaan. Mitä kuumempi säteilijä on kyseessä, sitä pienempi on säteilyn aallonpituus ja sen tehokkaampaa säteily on. Lämpöliikkeen lisääntymiseen ja vähentymiseen ja sitä kautta lämpötilaan vaikuttaa infrapunasäteilyn absorptio ja emissio. Infrapuna-alueella sähkömagneettinen kenttä vaikuttaa kappaleen varattuihin hiukkasiin ja voi siirtää näihin energiaa nostaen samalla kappaleen lämpötilaa. Tällöin kyseessä on absorptio ja kappale absorboi sähkömagneettista säteilyenergiaa. Emissiossa vastaavasti kappaleen hiukkaset luovuttavat eli emittoivat energiaa säteilemällä, ja kappaleen lämpötila laskee. [18]

4.3 Mustan kappaleen säteily

Musta kappale on käsite säteilijästä, jonka pinta absorboi täydellisesti kaiken siihen osuvan säteilyn millä tahansa aallonpituudella. Lisäksi musta kappale emittoi säteilyä, joka on suoraan verrannollinen pinnan lämpötilaan. Mikään kappale ei voi samassa lämpötilassa emittoida enemmän kuin musta kappale. Tällainen kappale ei heijasta tai sirota yhtään siihen kohdistuvaa säteilyä (valoa) ja näkyy siten huoneenlämpötilassa ihmissilmälle mustana. Sana musta on muuten säteilevän kappaleen yhteydessä ilmeisen harhaanjohtava. Mikäli mustan kappaleen lähettämään säteilyyn verrannollinen lämpötila ylittää $525\text{ }^{\circ}\text{C}$, säteilyn lähde alkaa muuttua näkyväksi siten, että se paljaalla silmällä tarkasteltuna lakkaa olemasta musta. Säteilijä muuttuu ensin punahehkuseksi, sitten lämpötilan edelleen noustessa, muuttuu oranssin kautta keltaiseksi ja valkoiseksi. Kappaleen niin kutsutun värilämpötilan määritelmä on se lämpötila, johon musta kappale tulee lämmittää, jotta saavutetaan sama näkyvä aallonpituus.

Mustana kappaleena voidaan pitää onteloa, jonka seinämät ovat samassa lämpötilassa. Seinämät emittoivat ja absorboivat sähkömagneettista säteilyä. Säteily ontelossa saavuttaa tasapainotilan, kun absorboituneen ja emittoituneen säteilyn määrä ovat yhtä suuria. Ontelossa vallitsee siten termodynaaminen tasapainotila, ja sähkömagneettisen kentän tiheys on vakio. Kun ontelon seinämään tehdään pieni reikä, pääsee sieltä ulos säteilyä, joka vastaa ontelossa vallitsevaa termistä tasapainotilaa. Tällaista säteilyä sanotaan mustan kappaleen säteilyksi, ja sen spektrinen intensiteetti riippuu vain ontelon seinien lämpötilasta. Käytännössä ideaalinen musta kappale on mahdottomuus. Se on kumminkin säteilijänä tärkeä käsite, sillä todellisten pintojen säteilyominaisuudet määritellään vertaamalla niitä mustaan kappaleeseen. Eräiden kappaleiden säteily on kuitenkin varsin lähellä mustan kappaleen säteilyä. Tällaisia voivat olla aurinko ja esimerkiksi

aallonpituusalueella $3\text{ }\mu\text{m} - 100\text{ }\mu\text{m}$ myös vastasatanut lumi. Mustan kappaleen säteily ei riipu kappaleen ominaisuuksista, kuten muodosta ja materiaalista, vaan ainoastaan säteilyn aallonpituuteen verrannollisesta lämpötilasta. Lämpösäteilyä kutsutaan mustan kappaleen säteilyksi säteilyjakauman johtamisessa käytettyjen termodynaamisten tasapainoehtojen takia.

4.4 Planckin säteilylaki

Mustan kappaleen säteilyn energiaspektrin tutkiminen johti kvanttimekaniikan keksimiseen. Max Planck (1858 – 1947) sanoi vuonna 1900, että jos säteily esimerkiksi edellä kuvatussa onkalossa on tasapainossa seinämän atomien kanssa, täytyy olla yhteys myös säteilyn energiaspektrin ja seinämän atomien energiajakauman välillä. Mittaustuloksena saatiin säteilyn spektri, eli tässä tapauksessa mustan kappaleen säteilyn energiatiheys eri taajuuksilla. Se noudattaa kaavaa

$$E_\nu(T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}, \quad (14)$$

joka tunnetaan Planckin säteilylakina. Kaavassa h on Planckin vakio ($h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Js), c on valon nopeus ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s), ν on säteilyn taajuus, k on Boltzmannin vakio ($k = 1,4 \cdot 10^{-23}$ J/K) ja T on termodynaaminen lämpötila. Merkintä $E_\nu(T)$ tarkoittaa spektristä säteilyenergiatiheyttä taajuuden suhteen esitettynä ja sen yksikkö on J/m³.

Planck sai sovitettua teorian ja koetulokset yhteen. Teoria selittyi myöhemmin oletuksesta, että säteilevä musta kappale lähettää sähkömagneettista säteilyä vain epäjatkuvasti tietyn suuruisina energiapaketteina eli kvantteina. Lisäksi todettiin, että pienin mahdollinen energiamuutos, joka voi tapahtua onkalon seinämän värähtelijöiden ja sähkömagneettisen kentän välillä, toteuttaa yhtälön $\Delta E = h\nu$. Pienin mahdollinen energiamuutos on siis suoraan verrannollinen vain säteilyn taajuuteen. Mustan kappaleen säteilyn energia muodostuu siten lausekkeen $h\nu$ monikerroista ja Planckin vakio h sovitaa kaavan empiirisesti mitattuun spektriin. Paras yhteensopivuus on havaittiin, kun $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Js, joka tunnetaan nimellä Planckin vakio.

Koska säteilykentän energiatheyttä $E_\nu(T)$ ei voida suoraan mitata, täytyy se määrittää mittaamalla säteilyn intensiteetti. Käytännön mittausten kannalta on käyttökelpoista johtaa vielä kaava säteilyvoimakkuudelle $B_\lambda(T)$, jonka yksikkö on W/m², ja ilmaista se aallonpituuden λ suhteen eli spektrisenä säteilyvoimakkuutena. Kaava saadaan johdettua, kun kirjoitetaan aluksi Planckin säteilylaki taajuuden ν sijasta aallonpituuden λ funktiona. Säteilyenergiatiheyttä esittää yhtälö

$$E_\nu(T) = \frac{dE}{d\nu}. \quad (15)$$

Koska tämä yhtälö on esitetty taajuuden suhteen, muutetaan se vastaamaan säteilyener-

giantiheyttä aallonpituuden suhteen, joten yhtälö saa muodon

$$E_\lambda(T) = \frac{dE}{d\lambda}. \quad (16)$$

Aaltoyhtälön mukaan, taajuuden ja säteilyn aallonpituuden välillä on yhteys

$$\nu = \frac{c}{\lambda}. \quad (17)$$

Sijoittamalla tämä Planckin kaavaan (14) taajuuden tilalle käyttämällä muunnoksessa apuna ketjusääntöä

$$\frac{dE}{d\lambda} = \frac{dE}{d\nu} \cdot \frac{d\nu}{d\lambda}, \quad (18)$$

missä $d\nu = -\frac{c}{\lambda^2} d\lambda$, saadaan Planckin kaava muotoon

$$E_\lambda(T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)}. \quad (19)$$

Saatu tulos esittää säteilyenergiatiheyden aallonpituuden suhteen. Mustan kappaleen energiatiheyden ja säteilyvoimakkuuden välillä pätee yhteys

$$B_\lambda(T) = \frac{c}{4} E_\lambda(T). \quad (20)$$

Sijoittamalla yhtälö (20) yhtälöön (19) saadaan lopulta Planckin kaava mustan kappaleen säteilyvoimakkuudelle aallonpituuden suhteen eli spektrinen säteilyvoimakkuus, jonka toteuttaa yhtälö

$$B_\lambda(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)}. \quad (21)$$

Spektrisen säteilyvoimakkuuden $B_\lambda(T)$ yksikkö on W/m^2 . Spektrinen säteilyvoimakkuus on esitetty kuudella eri lämpötilan arvolla kuvassa 8. Kuvasta havaitaan, että säteilyvoimakkuus ei jakaannu tasaisesti eri aallonpituuksille.

4.4.1 Wienin ja Rayleigh-Jeansin approksimaatiot

Planckin säteilylakia voidaan approksimoida kahdella merkittävällä yhtälöllä. Toinen yhtälöistä on Wienin approksimaatio, jota voidaan käyttää suurilla taajuuksilla ja toinen on Rayleigh-Jeansin approksimaatio pienille taajuuksille. Planckin säteilylaki syntyikin

aikoinaan yrityksestä löytää interpolaatiokaava näiden yhtälöiden välille. Vastaavasti kuin edellisessä kappaleessa, voidaan Planckin säteilylaista (14) johtaa kaava mustan kappaleen spektriselle säteilyvoimakkuudelle taajuuden suhteen $B_\nu(T)$. Kaava (14) on valmiiksi esitetty säteilyenergiatiheytenä taajuuden suhteen, joten käyttämällä mustan kappaleen säteilyvoimakkuuden ja energiatiheyden välillä pätevää yhteyttä

$$B_\nu(T) = \frac{c}{4} E_\nu(T), \quad (22)$$

saadaan Planckin kaava mustan kappaleen säteilyvoimakkuudelle taajuuden suhteen, kun sijoitetaan yhtälö (22) yhtälöön (14). Säteilyvoimakkuuden yhtälöksi saadaan sijoituksen jälkeen yhtälö

$$B_\nu(T) = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2 (e^{h\nu/kT} - 1)}. \quad (23)$$

Kun taajuus on suuri, eli $h\nu \gg kT$, voidaan arvioida että

$$e^{h\nu/kT} \gg 1. \quad (24)$$

Arvion (24) perusteella yhtälön (23) nimittäjässä esiintyvä vähennyslaskutermi (-1) voidaan jättää huomiotta, ja Planckin säteilylaki voidaan kirjoittaa muotoon

$$B_\nu(T) \approx \frac{2\pi h \nu^3}{c^2 e^{h\nu/kT}}. \quad (25)$$

Saatua yhtälöä (25) sanotaan Wienin approksimaatioksi. Sijoittamalla yhtälö (17) yhtälöön (23) ja käyttämällä apuna ketjusääntöä (18), voidaan Wienin approksimaatioyhtälö säteilemisvoimakkuudelle esittää aallonpituuden suhteen muodossa

$$B_\lambda(T) \approx \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 e^{hc/\lambda kT}}. \quad (26)$$

Wienin approksimaation aiheuttama virhe on alle prosentin, kun $\lambda T < 3,1 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$. Tämä raja ylittyy aallonpituudella 1050 nm vasta 2700 °C lämpötilassa. [19]

Jos taajuus on pieni, eli $h\nu \ll kT$, voidaan Planckin säteilylakia approksimoida Rayleigh-Jeansin approksimaatiolla. Pienillä taajuuksilla voidaan arvioida, että

$$e^{h\nu/kT} \approx 1 + \frac{h\nu}{kT}. \quad (27)$$

Sijoittamalla arvio (27) säteilyvoimakkuuden yhtälöön (23) saadaan yhtälöksi approksi-

maatio mustan kappaleen säteilyvoimakkuudesta pienillä taajuuksilla, mikä on muotoa

$$B_\nu(T) \approx \frac{2\pi\nu^2 kT}{c^2}. \quad (28)$$

Säteilyvoimakkuuden approksimaatioyhtälö (28) voidaan esittää aallonpituuden suhteen muodossa

$$B_\lambda(T) \approx \frac{2\pi ckT}{\lambda^4}. \quad (29)$$

Saatu Rayleigh-Jeansin approksimaatio (29) on klassisen fysiikan mukainen tulos. Yhtälöstä nähdään, että mentäessä kohti lyhyempiä aallonpituuksia, säteilyvoimakkuus kasvaa rajatta. Lyhyillä aallonpituuksilla eli suurilla fotonin energioilla kvanttiefektien merkitys kasvaa, ja klassinen fysiikka ei pystynytään selittämään havaittua ilmiötä. Tämä ongelma tunnetaan historiassa nimellä ”ultraviolettikatastrofi”.

4.4.2 Stefan- Boltzmannin laki

Mustan kappaleen kokonaissäteilyvoimakkuus saadaan selville integroimalla mustan kappaleen spektrinen säteilyvoimakkuus kaikkien aallonpituuksien yli, eli aallonpituuden arvosta $\lambda = 0$ arvoon $\lambda = \infty$. Integroimalla saadaan tulokseksi

$$B(T) = \int_0^\infty B_\lambda(T) d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4. \quad (30)$$

Saatua tulosta kutsutaan Stefan-Boltzmannin laiksi ja sen perusteella voidaan sanoa, että kokonaissäteilyvoimakkuus on verrannollinen lämpötilan neljänteen potenssiin. Vakio σ on Stefan-Boltzmannin vakio, jonka likiarvoksi saadaan

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} \approx 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}. \quad (31)$$

Stefan-Boltzmannin kaavan mukaan mustan kappaleen kokonaissäteilyteho kasvaa verrannollisesti absoluuttisen lämpötilan neljänteen potenssiin. Graafisesti kuvattuna $B(T)$ vastaa mustan kappaleen säteilyvoimakkuudesta piirrettyjen kuvaajien alapuolelle jääviä pinta-aloja, mikä voidaan havaita kuvasta 8.

4.4.3 Wienin siirtymälaki

Säteilyvoimakkuuden kuvaajat, joita sanotaan Planckin käyriksi, esittävät kuvassa 8 energiatheyden jakaumaa kuudella eri lämpötilan arvolla. Energiatiheyden maksimia

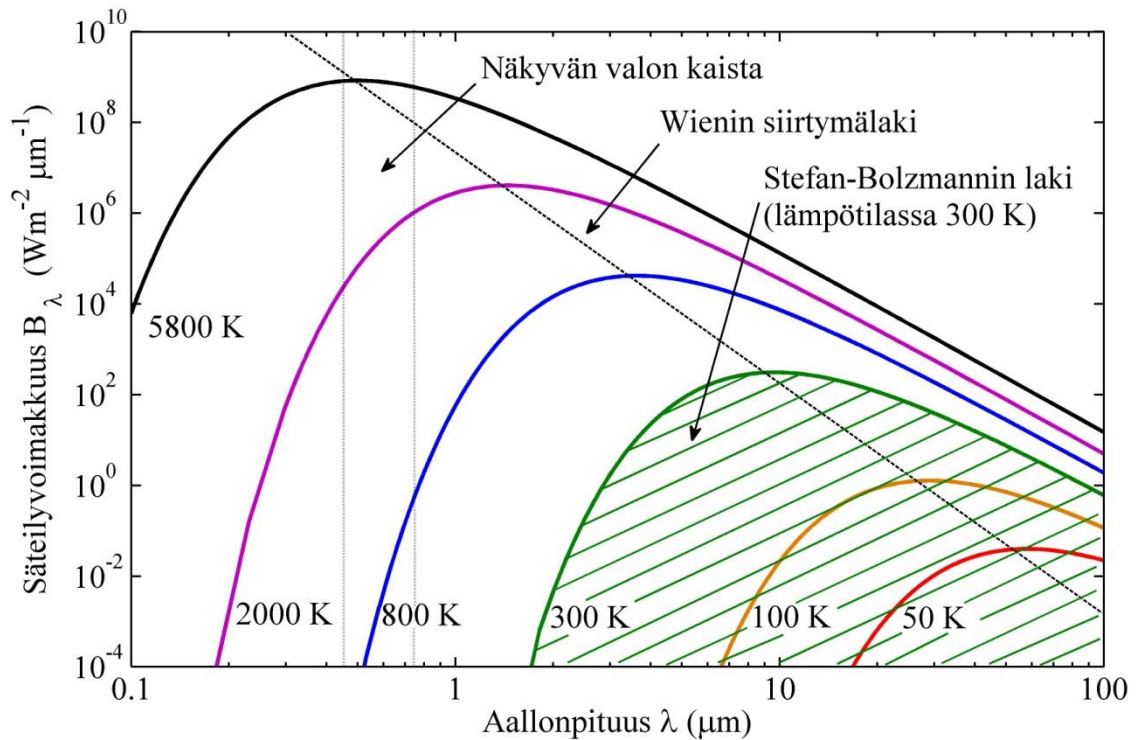
vastaava aallonpituus saadaan selville derivoimalla Planckin laista johdettu säteilyvoimakkuuden yhtälö $B_\lambda(T)$ aallonpituuden suhteen ja määrittämällä kyseisen derivaatan nollakohta yhtälöllä

$$\frac{dB_\lambda(T)}{d\lambda} = 0. \quad (32)$$

Yhtälö voidaan ratkaista ainoastaan numeerisesti, joten energiatiheysjakauman maksimikohtaa vastaavaksi aallonpituudeksi saadaan

$$\lambda_{max} = \frac{2898 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{K}}{T}. \quad (33)$$

Tätä yhtälöä kutsutaan nimellä Wienin siirtymälaki. Sen mukaan mustan kappaleen säteilyenergiajakautuksen maksimikohtaa vastaava aallonpituus siirtyy kohti lyhyempää aallonpituutta, kun lämpötila kasvaa. Aallonpituuden λ_{max} ja lämpötilan T välillä on siten lineaarinen riippuvuus, jota on havainnollistettu kuvassa 8 näkyvällä pistekatkoviivalla.



Kuva 8. Mustan kappaleen spektrinen säteilyvoimakkuus aallonpituuden funktiona eri lämpötiloissa, sekä säteilyvoimakkuuden maksimin riippuvuus lämpötilasta.

Kuvassa 8 Planckin lakiin perustuvista eri lämpötiloista muodostetuista graafisista kuvaajista nähdään, että säteilyvoimakkuus on nolla, kun aallonpituus λ lähestyy nollaa. Säteilyvoimakkuus saavuttaa ääriarvon aallonpituudella λ_{max} . Tämän ääriarvon ohitet-

tuaan säteilyvoimakkuus lähestyy jälleen nollaa erittäin pitkillä aallonpituuksilla. Mitä korkeampi on lämpötila, sitä lyhyemmällä aallonpituudella ääriarvo saavutetaan. Kappaleen lähettämän säteilyn spektri riippuu siis lämpötilasta. Kun kappaleen lämpötila nousee, sen lähettämä säteily voimistuu ja muuttuu keskimäärin yhä lyhytaaltoisemmaksi. Vastaavasti lämpötilan laskiessa kappaleen säteilyteho heikkenee ja säteilyn aallonpituus keskimäärin pitenee. Esimerkiksi aurinko, minkä fotosfäärin lämpötila on 5800 K, säteilee energiaa kaikilla sähkömagneettisen säteilyn spektrin kaistoilla. Aurin gon säteilyvoimakkuus on kuitenkin tehokkaimmillaan näkyvän valon kaistalla ($0,4 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 0,78 \mu\text{m}$), ja sen maksimikohtaa vastaava aallonpituus λ_{max} on keltaisen valon aallonpituusalueella ($0,57 \mu\text{m}$), kuten kuvasta 8 nähdään. Wienin siirtymälaki ilmaisee- kin matemaattisesti sen yleisen havainnon näkyvän valon kaistalta, että lämpötilan noustessa lämpösäteilijän väri vaihtuu punaisesta oranssin kautta keltaiseen ja valkoi- seen.

4.5 Emissiivisyys

Todelliset kappaleet eivät ole täydellisiä mustaan kappaleeseen verrattavia säteilijöitä, joten ne eivät käyttäydy pelkästään edellä esiteltyjen lakien mukaan. Ne voivat kum- minkin säteillä mustan kappaleen tavoin tietyillä spektrin alueilla. Jokainen todellinen kappale, johon kohdistetaan sähkömagneettista säteilyä, aiheuttaa joillakin aallonpi- tuuksilla fotonien absorboitumisen, mutta ei kaikilla aallonpituuksilla. Absorboimatta jääneet fotonit voivat myös sirota eli heijastua tai läpäistä aineen. Näiden kolmen säh- kömagneettisen säteilyn vuorovaikutusmekanismin tehokkuuksia kuvataan suhdeluvuil- la, joissa absorboitunutta, heijastunutta ja läpäissyttä säteilyä verrataan kappaleeseen tulleeeseen säteilyyn. Koska jokainen näistä tekijöistä on enemmän tai vähemmän riip- puvainen aallonpituudesta, käytetään alaindeksiä λ , joka ilmaisee näiden riippuvuuden spektrin alueesta. Merkitään absorboituneen säteilyn osuutta absorptiosuhteella α_λ , hei- jastuneen säteilyn osuutta heijastussuhteella ρ_λ ja läpäisseen säteilyn osuutta lä- päisyysuhteella τ_λ . Koska näiden kolmen tekijän summan on aina vastattava säteilyn ko- konaismäärää, saadaan relaatio

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1. \quad (34)$$

Mustalle kappaleelle absorptiosuhteen arvo on yksi ja heijastus- ja läpäisyysuhteen arvot ovat nollia.

Kun mitataan todellisen kappaleen infrapunasäteilyyn verrannollista lämpötilaa, täy- tyy tietää kuinka suuri osuus kappaleen lähettämästä säteilystä on mustan kappaleen säteilyä. Tällöin joudutaan ottamaan käyttöön vielä emissiivisyydeksi kutsuttu lisäteki- jä. Emissiivisyys on pinnan ominaisuus, mikä kuvaa kuinka suuri osa pinnan säteilystä on kappaleen emittoimaa, ja kuinka suuri osa on sen pinnasta heijastuvaa ympäristön säteilyä. Mitä suurempi emissiivisyys, sitä enemmän kappale emittoi omaan lämpöti- laansa verrannollista säteilyä. Emissiivisyys määritelläänkin tietyssä lämpötilassa ole-

van kappaleen lähettämän lämpösäteilyn ja samassa lämpötilassa olevan täydellisen säteilijän eli mustan kappaleen emittoiman säteilyn suhteella. Suhdeluvusta, joka on todellisten kappaleiden kohdalla ykkösen ja nollan välillä oleva desimaaliluku, saadaan materiaali-kohtainen emissiivisyyskerroin ε . Kappaleen kyky emittoida ja heijastaa säteilyä on lämpötilan mittauksen kannalta tärkeää erottaa toisistaan. Heijastunut säteily ei liity mitattavan kappaleen lämpötilaan, koska se on kappaleen ulkopuolelta tullutta ja kappaleen pinnasta sironnutta tai sen läpäissyttä säteilyä. Emittoitunut säteily puolestaan on kappaleen lämpötilaan verrannollista, eli sen sisäisestä energiasta johtuvaa säteilyä.

Jos kappale ei olekaan musta, vaan se heijastaa osan saapuvasta säteilystä, sitä sanotaan harmaaksi. Harmaan, kuten myös mustan kappaleen, nimitys tulee vain jonkin-tasoisesta värianalogisesta ajattelumallista, vaikkakin infrapunasäteilyn aallonpituusalue on näkyvän valon aallonpituusalueen ulkopuolella. Mustan ja harmaan kappaleen emissiivisyys ei riipu aallonpituudesta, mutta jos emissiivisyys vaihtelee aallonpituuden mukaan, sanotaan kappaletta selektiiviseksi säteilijäksi. Selektiivinen säteilijä edustaa parhaiten todellisen maailman kappaleita. Säteilylähteet jaetaankin yleisesti kolmeen eri tyyppiin niiden emissiivisyyden aallonpituusriippuvuuden perusteella. Jos emissiivisyys saa arvon yksi eri aallonpituuksilla, niin säteilijä on musta kappale. Jos emissiivisyys on pienempi kuin yksi, mutta on vakio aallonpituudesta riippumatta, niin säteilijä on harmaa kappale. Kun emissiivisyys vaihtelee eri aallonpituuksilla, niin säteilijä on selektiivinen.

Todellisen kappaleen emissiivisyyden huomioimiseksi, liitetään Planckin yhtälön eteen yleensä emissiivisyyskerroin ε_λ , missä alaindeksi λ kuvaa emissiivisyyden aallonpituusriippuvuutta. Emissiivisyys määritellään todellisen säteilijän spektrisen säteilyvoimakkuuden R_λ suhteena mustan kappaleen spektriseen säteilyvoimakkuuteen B_λ , joten se on muotoa

$$\varepsilon_\lambda = \frac{R_\lambda(T)}{B_\lambda(T)}. \quad (35)$$

Todellisten kappaleiden emissiivisyyskerroin ε_λ voi riippua aallonpituuden lisäksi myös lämpötilasta, säteilykulmasta sekä kappaleen kemiallisesta koostumuksesta ja pinnan olomuodosta. Emissiivisyys on niin yksilöllinen, että sen avulla voidaan varsin hyvin tunnistaa eri aineita. Lisäksi esimerkiksi kaasujen emissiokerroin vaihtelee hyvin nopeasti aallonpituuden funktiona verrattuna kiinteisiin aineisiin. Tästä syystä emissioker-toimen määrittäminen on yksi hankalimmista asioista infrapunasäteilyn mittaussovel-luksissa. [5]

4.6 Kirchhoffin säteilylaki

Absorptiosuhteella α_λ kuvattiin edellä todellisen kappaleen absorboimaa säteilyvoimakkuuden osuutta siihen saapuvasta säteilyvoimakkuudesta $B_\lambda(T)$. Tämän perusteella to-

delliseen kappaleeseen absorboituneen säteilyvoimakkuuden osuus siihen saapuvan säteilyvoimakkuuden avulla ilmaistuna on

$$\alpha_{\lambda} B_{\lambda}(T), \quad (36)$$

ja absorboitumattoman säteilyn osuudeksi saadaan

$$(1 - \alpha_{\lambda}) B_{\lambda}(T). \quad (37)$$

Kun kappale on termodynaamisessa tasapainossa ympäristönsä kanssa, se emittoi kaikki absorboituneen ja sen lämpötilaa nostavan energian ympäristöönsä. Emittoituneen säteilyvoimakkuuden osuus on

$$\varepsilon_{\lambda} B_{\lambda}(T), \quad (38)$$

joten saadaan ehto

$$B_{\lambda}(T) = (1 - \alpha_{\lambda}) B_{\lambda}(T) + \varepsilon_{\lambda} B_{\lambda}(T), \quad (39)$$

mikä supistuu muotoon

$$\varepsilon_{\lambda} = \alpha_{\lambda}. \quad (40)$$

Tämä ehto (40) tunnetaan Kirchhoffin säteilylakina, ja se tarkoittaa että ympäristönsä säteilykentän kanssa termodynaamisessa tasapainotilassa olevan kappaleen täytyy emittoida yhtä paljon energiaa kuin se sitä absorboi. Mikäli tämä emission ja absorption keskinäinen suhde muuttuu, alkaa kappale joko jäähtyä tai lämmetä. Kirchhoffin laki kuvaa siten energian häviämättömyyttä.

5 PALONILMAISUTEKNIikka

Pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilastointijärjestelmä PRONTO:n mukaan hätäkeskukset vastaanottivat vuonna 2008 automaattisista paloilmoittimista yli 20 000 hälytystä. Niistä 97,5 % oli erheellisiä hälytyksiä, eli tilanteita, joissa ei ollut tarvetta sammutus tai pelastustoimiin [20]. Nykyhetken ja tulevaisuuden suurin tavoite palonilmaisulle onkin erheellisten hälytysten minimointi. Ideaalinen kehitettävä palonilmaisoin olisi sellainen, joka havaitsisi tulipalon varhaisessa vaiheessa ja luotettavasti. Nämä ominaisuudet ovat haasteellisia saada toteutumaan yhtä aikaa.

Paras mahdollinen palonilmaisuus perustuu aina tilanteen tasalla olevaan palonilmaisujärjestelmään. Palonilmaisujärjestelmän tehtävä on kerätä ja arvioida paloilmallisimilta tulevaa mittausinformaatiota. Tämä edellyttää järjestelmältä kykyä erottaa todellisten palojen mittausarvot erheellisiin hälytyksiin johtavista mittausarvoista. Palonilmaisujärjestelmän mittautietoa lähetetään koko ajan paloilmoitinkeskukseen, joka analysoi tietoa ja tekee siitä johtopäätöksiä.

Palamiseen liittyy aina lukuisia kemiallisten ja fysikaalisten reaktioiden sarjoja, jotka muodostavat kokonaisuudessaan palavan materiaalin kanssa monimutkaisen mekanismin. Sen mallintaminen ja ennustaminen vaatisi muiden mekanismien, kuten rakenne-, virtaus- ja lämmönsiirtomekanismien tuntemusta. Haasteita luotettavaan palonilmaisuun aiheuttavat myös tulipalossa esiintyvät palavat aineet, jotka eivät ole yleensä polttoaineeksi tarkoitettuja. Satunnaisesti esiintyvien palavien aineiden pyrolyysireaktiot ovat usein tuntemattomia, ja samatkin yhdisteet voivat reagoida erilaisissa ilmasseoksissa sekä vaihtelevissa lämpötila- ja paineolosuhteissa eri tavalla. Lisäksi pyrolyysireaktion kehityskulku rakentuu usein enemmän palavan aineen fyysisen muodon kuin sen kemiallisen laadun mukaan. [21]

Palonilmaisuun liittyvä tutkimus- ja kehitystyö on nykyään keskittynyt signaalinkäsittelyyn ja palamisen tarkempaan analysointiin. Yhä tehokkaammat ja edullisemmat signaalinkäsittelyprosessorit ovat mahdollistaneet edellisissä kappaleissa esitettyjen lämpöön ja sähkömagneettiseen säteilyyn liittyvien teorioiden ja lainalaisuuksien laajan soveltamisen palonilmaisujärjestelmiin. Tavoitteena on ollut älykkyyden lisääminen ja väärin hälytysten määrän minimoiminen ilmaisuherkkyyttä heikentämättä. Monisensori- ja monikriteeritekniikoiden avulla palonilmaisujärjestelmien erottelukykä ja varmuutta on pystytty parantamaan. Lisäksi uusissa ilmaisimissa on sisäänrakennettu automaattikalibrointi, joka pitää ilmaisimien hälytysherkkyyden tasaisena likaantumisesta huolimatta. [22]

5.1 Paloilmoitin ja palonilmaisujärjestelmät

Paloilmoittimella tarkoitetaan laitetta, joka antaa automaattisesti ja välittömästi ilmoituksen alkavasta palosta sekä siihen kytketyn muun laitteiston toimintavalmiutta vaarantavista vioista paikalliseen tai yleiseen keskukseen. Paloilmoittimien eri teknologiatasot ryhmitellään palonilmaisuoimaishuoksien eli käytettävän palonilmaisujärjestelmän perusteella seuraavasti [23]:

- Perinteiset eli konventionaaliset palo ilmoittimet
- Osoitteelliset palo ilmoittimet
- Osoitteelliset ja analogiset palo ilmoittimet
- Aktiiviset ohjelmoitavat ja analysoivat palo ilmoittimet

Perinteiset eli konventionaaliset palo ilmoittimet antavat ilmoituksen vain paloryhmätasolla, ja niissä ei ole säätö- ja asettelumahdollisuuksia. Osoitteellisissa palo ilmoittimissa ilmaisijärjestelmään kuuluvat ilmaisimet, painikkeet ja muut silmukakkomponentit on varustettu osoitepiirillä, joten palotilanteessa saadaan tieto hälyttäneiden ilmaisimien osoitteista ja hälytysjärjestyksestä [23]. Osoitteellisessa palo ilmoitinjärjestelmässä osoitteet voidaan ryhmitellä tarkoituksenmukaisella tavalla paloryhmiin. Paloryhmätieto on paikantamiskaaviossa esiintyvä yhtenäinen alue, jonka perusteella palokunta voi paikantaa alueen, josta palo ilmoitus on tullut. Pelkästään osoitteellisen järjestelmän ilmaisimet ovat kuitenkin perinteistä tekniikkaa, ja palotieto välitetään niistä binäärisenä kosketintietona raja-arvon ylittymisen perusteella. Osoitteellinen ja analoginen järjestelmä sisältää eri suureita mittaavia antureita. Tämä mahdollistaa sen, että ilmaisimilta saadaan keskukselle analoginen mittaustulos, jonka perusteella palopäätely tehdään. Aktiivisissa ohjelmoitavissa ja analysoivissa palo ilmoittimissa järjestelmän komponentit sisältävät valmistajakohtaisia ohjelmistoja. Sekä keskuslaitteet että ilmaisimet ovat mikroprosessoripohjaisia. Järjestelmissä on monipuoliset asettelu- ja säätömahdollisuudet, joiden avulla pyritään tarkkaan vasteeseen palotilanteessa. Tällaiset palo ilmoitinjärjestelmät ovat helposti liitettävissä esimerkiksi valvontagrafiikkaan ja kohteessa oleviin automaatiojärjestelmiin. [23]

Palonilmaisuus voi perustua hajautettuun tai keskitettyyn järjestelmään. Hajautetussa järjestelmässä paloanalyysi voidaan suorittaa ilmaisinten sisäisellä mikroprosessorilla, ja keskitetyissä järjestelmissä paloanalyysi tehdään palo ilmoitinkeskuksessa. Molemmissa järjestelmissä on tällöin monipuoliset asettelu- ja säätömahdollisuudet. Tällaiset palonilmaisujärjestelmät voidaan integroida osaksi muita järjestelmiä. Palo ilmoittimeen voidaan ilmaisimpiin lisäksi liittää palonrajoitus- ja sammutuslaitteistojen sekä pelastustöitä helpottavien laitteistojen toimintailmoituksia omaan paloryhmäänsä. Liitettäviä järjestelmiä voisivat olla automaattinen sammutus, savunpoisto ja ilmanvaihto sekä esimerkiksi kiinteistön oma onnettomuustilanteiden hallintajärjestelmä. Palo ilmoitin voi myös jakaa monipuolista anturitietoaan muille järjestelmille ja ohjata niiden toimintaa, vaikka mikään muu järjestelmä ei saa ohjata palo ilmoitinta. [23]

5.2 Paloilmaisintyytit

Tavallisia syitä erheellisiin palo ilmoituksiin ovat väärin valitut tai sijoitetut ilmaisimet, asennusvirheet ja puutteellinen ylläpito. Ilmaisimien valinnassa onkin kiinnitettävä erityistä huomiota kohteen olosuhteisiin ja käyttötarkoitukseen. Merkittävä osa erheellisistä ilmoituksista johtuu myös käytössä olevasta konventionaalista palon ilmaisutekniikasta, jossa ei ole säätö- ja asettelumahdollisuuksia. Laitekannan uusiutuessa konventionaaliset ilmaisimet korvautuvat kehittyneemmällä ilmaisimilla, jotka pystyvät paremmin erottamaan häiriötekijät todellisista palotilanteista. Tämä johtanee erheellisten ilmoitusten vähenemiseen, mutta muutos tapahtuu vähitellen.

Palon ilmaisujärjestelmiin asennetut paloanalyysiohjelmistot huomioivat yleensä sekä ilmaisimilta tulevien signaalien absoluuttiset arvot että niiden käyttäytymisen ajan suhteen. Tulevaisuuden sovelluksissa paloanalyysiohjelmistoihin sisällytetään yhä kehittyneempiä laskenta-algoritmeja ja erilaisia palomalleja sekä ennusteita, joiden perusteella palopäätely voidaan tehdä yhä luotettavammin. Kaikesta huolimatta, itse ilmaisu perustuu edelleen perinteisiin palon tunnusuuksiin. Paloilmaisimet jaetaankin yleensä neljään pääryhmään niiden havaitseman fyysisen suureen tai ilmiön perusteella. Ilmaisimet voivat reagoida:

- Lämpötilaan tai sen nousunopeuteen
- Liekin tai kytevän pesäkkeen emittoimaan sähkömagneettiseen säteilyyn, kuten näkyvään valoon, ultraviolettii- tai infrapunasäteilyyn
- Palossa muodostuviin kaasuihin, kuten hiilimonoksidiin eli häkään, hiilidioksiidiin, hiilivetyihin tai vesihöyryyn
- Savuhiukkasiin
- Edellä lueteltujen ilmiöiden yhdistelmiin

Lisäksi ilmaisinten ulkoisen rakenteen vuoksi ne voidaan jakaa vielä näytteenotto-, pisteilmais- tai linjailmaisintyypeihin.

5.2.1 Lämpöilmaisimet

Lämpöilmaisin reagoi nimensä mukaisesti ympäristönsä lämpötilaan. Yksinkertaisimmillaan yläraja- eli maksimaali-ilmais- (M-ilmais-) toimii silloin, kun sen tuntoelimen lämpötila saavuttaa ennalta asetetun raja-arvon. Tyypillisin M-ilmais- voi perustua bimetallikytkimeen, joka tietyssä lämpötilassa kytkeytyy mekaanisesti päälle metallien erilaisen lämpölaajenemisen seurauksena. Kytkimessä on usein elektroninen pitopiiri, mikä säilyttää tiedon ilmaisimen toiminnasta vielä lämpötilan laskemisen jälkeenkin, vaikka kytkin aukeaisi. Termistä kontaktia ympäröivään ilmaan parannetaan metallivai- palla ja tähän liitetyllä lämmönkeräilylevyllä. M-ilmaisimissa on käytetty myös lämpösulakkeita, mutta niiden haittana on kertakäyttöisyys, eli lämpösulake joudutaan vaihtamaan jokaisen ilmoituksen jälkeen. M-ilmaisimia joudutaan käyttämään usein, kun

tilassa esiintyy normaalisti runsaasti savua, käryä sekä nopeita lämpötilan vaihteluita. M-ilmaisimen toimintalämpötila-alueeksi valitaan vähintään 10 °C suurempi lämpötila kuin tilan korkein lämpötila. Tietyissä kohteissa voi esimerkiksi kesäisin lämpötila nousta huomattavasti korkeammalle kuin tyypillinen kohteen keskimääräinen lämpötila, tällöin valitaan ilmaisin toimintalämpötila-alueeltaan korkeammasta luokasta.

Lämpöilmaisin voi mitata myös lämpötilan muutosnopeutta. Differentiaali-ilmaisim (D-ilmaisim) antaa ilmoituksen, kun lämpötilan nousu on riittävän suurta tietyssä ajassa. Ilmaisim voi rakentua kahdesta painekammioista, joista toinen kammio on sijoitettu siten, että se on alttiimpi nopeammalle lämpötilan nousulle, kuin toinen kammio. Kammioiden välille syntyy tällöin paine-ero, joka ehtii tasaantua pienen venttiilin kautta, jos lämpötila muuttuu riittävän hitaasti. Tulipalossa lämpötila nousee yleensä hyvin nopeasti, ja paine-ero ei ehdi tasoittua, vaan kammioiden välinen paineekytkin sulkeutuu antaen ilmoituksen keskukselle. Tällainen differentiaalitoiminto saadaan toteutettua myös kahden NTC-vastuksen avulla. Toinen vastuksista sijoitetaan hyvään termiseen kontaktiin ilmaisinta ympäröivän ulkoilman kanssa ja toinen huonompaan termiseen kontaktiin ilmaisimen kuoren sisälle. Vastusten välisestä resistanssierosta saadaan lämpötilan nousunopeus eli D-toiminto ja ulkoilmassa olevan vastuksen resistanssista M-toiminto.

Maksimilämpötila- ja nousunopeuskriteerit yhdistävää lämpöilmaisinta kutsutaan differentiaalimaksimaali-ilmaisimeksi (DM-ilmaisim). DM-ilmaisim hälyttää, kun ennalta määritelty lämpötilannousunopeus ylittyy, tai kun hitaasti nouseva lämpötila saavuttaa hälytysrajan. DM-ilmaisimia käytetään, kun tilassa normaalisti esiintyy runsaasti savua tai käryä, mutta ei nopeita lämpötilan vaihteluita. Tällaiset edellä kuvatut pisteilmaisintyyppiset lämpöilmaisimet antavat ilmoituksen vasta, kun palo on liekehtivää tai tuottaa runsaasti lämpöä.

Kun suojataan laajoja ja korkeita yhtenäisiä tiloja, käytetään suojaukseen pisteilmaisimien sijasta linjailmaisimia. Linjalämpöilmaisim voi rakentua erilaisista lämpötilan mukana muuttuvista kaapeleista. Linjalämpöilmaisimet jaetaan integroiviin ja ei-integroiviin ilmaisimiin. Integroivat linjailmaisimet ovat yleisimmin analogisia ilmaisinkaapeleita, jotka summaavat lämpötilavasteen koko kaapelin matkalta. Tästä syystä samanlainen ilmaisu voidaan saada kaapelin paikallisesta kuumasta pisteestä tai koko kaapelin tasaisesta lämpenemisestä, jolloin hälytyskohtaa ei voida paikantaa. Hälytysrajoja voidaan säätää, mutta niitä valittaessa tulee ympäristön lämpötilaolosuhteet tuntea hyvin. Ei-integroivat linjailmaisimet ovat digitaalisia. Ne reagoivat joka kohdassaan tiettyyn kynnyslämpötilaan. Linjalämpöilmaisimissa käytetään myös hyväksi kuituoptiikkaa ja valon taipumisen muuttumista lämpötilan vaikutuksesta.

5.2.2 Savuilmaisimet

Suurin osa tulipaloista on kyteviä paloja, joissa alkuvaiheessa syntyy savua, mutta lämpötilan nousu on olematonta. Palossa syntyvän savun hiukkastiheys ja koko riippuvat olennaisesti palavasta materiaalista ja palon luonteesta. Kytevässä palossa on palokaasujen joukossa nestemäisiä pyrolyysituotteita, joiden hiukkaskoko on suuri (noin 0,1 µm).

Savu on tällöin vaaleaa, koska valo heijastuu hyvin suurista hiukkasista. Liekehtivässä ja täydellisessä palamisessa hiukkaskoko on pienimmillään (noin $0,01\mu\text{m}$). Savu on tällöin tummaa ja lähes läpinäkymätöntä, sillä valon aallonpituutta pienemmät hiukkaset eivät voi heijastaa valoa. Eri savuilmaisintyyppit ovat herkimmillään erikokoisille hiukkasille. Savuilmaisimet jaetaan toimintaperiaatteensa mukaan optisiin ja ionisavuilmaisimiin.

Optinen savuilmaisin on erityisen herkkä suuria partikkeleita sisältävälle näkyvälle vaalealle savulle, jota syntyy hitaasti kehittyvässä kytevässä palossa [24]. Sen toiminta perustuu valon absorptioon tai heijastumiseen savussa. Optiset ilmaisimet jaetaan tämän perusteella vielä kahteen pääryhmään läpivalo- ja hajavaloilmaisimiin. Ilmaisimien, joka mittaa valon intensiteetin pienenemistä eli absorptiota savussa, toimii niin sanotun vaimennusperiaatteen mukaan ja kutsutaan nimellä läpivaloilmaisimien. Tällainen ilmaisimien koostuu mittauskammioon rakennetuista lähettimeistä ja vastaanottimesta. Jos savua ilmestyy lähettimeen ja vastaanottoyksikön väliin, tapahtuu säteilyn intensiteetin vaimeneminen, johon ilmaisimen detektori reagoi. Optinen ilmaisimien, joka reagoi savuhiukkasten sirottamaan valon intensiteettiin eli hajavaloon, kutsutaan nimellä hajavalotai sirontailmaisimien. Sirontailmaisimen mittauskammion sisältämien lähettimeen ja vastaanottimen väliin on laitettu este suoralle valon säteelle. Kun ilmaisimien on kosketuksissa savuun, alkaa valo sirotta savuhiukkasista, jolloin osa valosta osuu valoherkälle detektorille.

Ioni-savuilmaisimen toiminta perustuu tavallisesti kahteen ionisaatiokammioon, joista toinen on savulle avoin mittauskammio ja toinen suljetumpi vertailukammio. Kammioissa on elektrodit, joiden välissä olevan ilman molekyylejä ionisoidaan yleensä radioaktiivisella säteilylähteellä. Säteilylähteen alfa-hiukkaset aiheuttavat elektrodien väliin ionisaatiovirran. Vertailukammion ionisaatiovirta on kyllästystilassa, mutta savulle avoimeen kammioon tunkeutuvat savuhiukkaset pienentävät ionisaatiovirtaa. Elektrodien välissä kulkevan ionisaatiovirran pieneneminen johtuu varauksenkuljettajien törmäilystä savuhiukkasiin. Tällöin avoimen kammion sisäinen vastus kasvaa, ja savu havaitaan virran muutoksena. Ioni-ilmaisimet ovat yleensä herkimmillään, kun savun hiukkaskoko on pieni.

Savun havaitsemiseen tarkoitetut optiset linjailmaisimet perustuvat yleensä infrapunasäteiden etäisyysvaimenemisperiaatteeseen savussa. Periaatteena linjailmaisimella on lähettää infrapunalähettimeillä signaalia ja vastaanottimella vastaanottaa signaalia. Mikäli signaalissa tapahtuu vaimenemista ja raja-arvo saavutetaan, ilmaisimien lähettää hälytystiedon keskukselle. Savulinjailmaisimia käytetään lähinnä suojaamaan suuria avoimia tiloja ja alueita, jolloin lähetin voidaan asentaa valvottavan alueen toiselle puolelle ja vastaanotin toiselle. Havainnointiväli voi olla 10 m – 100 m. Optisen matkan kasvattamiseksi voidaan käyttää peilejä tai prismoja, joiden välillä täytyy olla esteetön näkyvyys. Pöly, höyryt tai työstämisestä tuleva savu vaikeuttavat järjestelmän toimintaa. Mitkään esineet, kuten katossa liikkuvat nosturit, tikkaat, kannettavat esineet, eivät saa katkaista ilmaisimen lähettämää infrapunasädettä.

Valonsädeilmaisain on erityisilmaisain, jota käytetään havaitsemaan paloja, joissa ei synny savuhiukkasia. Tällaisia ovat puhtaan alkoholin palot. Valonlähteenä käytetään laserservaloa ja havaittavana ilmiönä valon taipumista kuumissa höyryissä. Tällainen ilmaisin voidaan luokitella myös lämpöilmaisimeksi.

5.2.3 Kaasuilmaisimet

Kaasuilmaisimet ovat usein tyypiltään näytteenottoilmaisimia, ja ne reagoivat pyrolyysireaktiossa tai kaasuvuodossa vapautuviin kaasuihin. Yleisimmät mitattavat kaasut ovat rikkivety, hiilimonoksidi, happi ja räjähtävät kaasut. Kaasuilmaisain antaa hälytyksen, kun kaasu hapettaessaan muuttaa puolijohdeanturin pintavastusta. Toinen toimintamalli perustuu katalyyttiin, jossa katalyyttielementti kiihdyttää kaasujen hapettumista. Tällöin mitattavana suureena on palamisen vuoksi kohoava lämpötila. Tällaiset kaasuanalyysieihin perustuvat ilmaisimet valmistetaan usein siten, että ne voidaan tapauskohtaisesti säätää eri kaasuille herkäksi. Näytteenottoputkiston avulla voidaan yhden ilmaisimen havainnoimaa aluetta kasvattaa.

5.2.4 Liekki-ilmaisimet

Liekki-ilmaisimen toiminta perustuu liekin lähettämän infrapuna- tai ultraviolettisäteilyn tai niiden yhdistelmän havainnointiin. Pienen liekin emittoima säteily on peräisin atomien ja ionien viritystilojen laukeamisesta. Suurissa, läpimitaltaan 0,3 m:n liekeissä, säteily on pääasiassa nokihiukkasten emittoimaa infrapunasäteilyä. Ilmaisimen toimintaperiaatteena on havaita säteily sekoittamatta sitä kuitenkaan ympäristön taustasäteilyyn. Liekki-ilmaisimien toimintaa voivat joskus haitata monet ympäristön häiriötekijät, kuten auringonvalo, keinovalo, lämpölähteet, hitsaaminen ja hälytysajoneuvojen vilkut. Tämän vuoksi liekki-ilmaisimet on säädettävä suhteellisen epäherkiksi. [25]

Ultraviolettisäteilyä havainnoivien liekki-ilmaisimien herkkyysalueeksi valitaan se osa ultraviolettisäteilyn spektristä, jolla liekkien säteily on voimakkaimmillaan. Ilmaisimena on usein Geiger-Müller-putki, jonka toiminta perustuu valosähköiseen ilmiöön. Tyypillisesti ultraviolett-ilmaisimella voidaan havaita 0,1 m²:n suuruinen palo 10 metrin etäisyydeltä, mutta herkkyys pienenee ratkaisevasti, mikäli savu vaimentaa liekin lähettämää säteilyä. Esimerkiksi silmälle näkymätön voiteluöljykerros voi absorboida ultraviolettisäteilyä jopa 80 %, minkä vuoksi ilmaisinta ei suositella konehuoneisiin ja moottorituloihin. Ilmaisimissa on yleensä elektroninen suodatin, joka estää hälytyksen hetkellisistä säteilyilmiöistä, kuten salamasta tai kosmisesta säteilystä.

Infrapuna-liekki-ilmaisain reagoi liekkien, useimmiten hiilidioksidikaasun CO₂, emittoimaan infrapunasäteilyyn. Erheellisten hälytysten välttämiseksi ilmaisimia on myös kaksi- ja kolmekanavaisia. Monikanavainen ilmaisimen tuntoelin havaitsee säteilyä usealla eri aallonpituusalueella, jolloin taustasäteilyä voidaan suodattaa pois. Luotettavia yksikanavaisia infrapunailmaisimia on myös olemassa. Niissä taustasäteily on eliminoitu optiikalla ja kaistanpäästösuodattimella. Infrapunailmaisimilla voidaan havaita 0,1

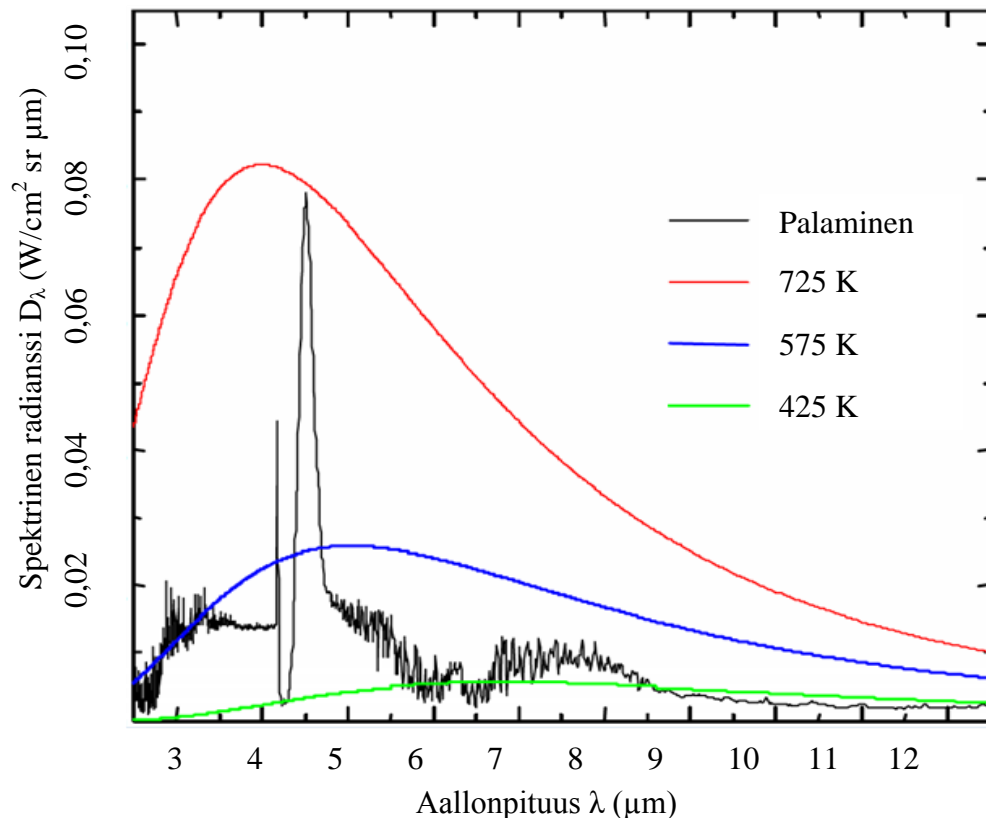
m²:n suuruinen palo jopa 40 metrin etäisyydeltä. Pöly vaimentaa infrapunasäteilyä huomattavasti vähemmän kuin ultraviolettisäteilyä, joten infrapunailmaisimella palo voidaan havaita syvemmältä pölyn seasta, ja ilmaisin toimii likaantuneenakin. Infrapunailmaisimella voidaan myös nähdä osittain kohteiden taakse, koska infrapunasäteily heijastuu hyvin. Liekin tunnistamisessa voidaan käyttää hyväksi myös liekille ominaista lepatustaajuutta. Kohdetilasta voidaan optisten kuitujen avulla siirtää liekin tunnistaminen myös tilan ulkopuoliseen ilmaisinyksikköön. Liekki-ilmaisimet ovat ainoita mahdollisia ilmaisimia avoimissa kohteissa, joissa palojen synnyttämää lämpöä tai savua ei voida luotettavasti havaita. On olemassa myös kipinäilmaisimia, mitkä toimivat muuten samalla tavalla kuin liekki-ilmaisimet, mutta ne reagoivat infrapunasäteilyn tehonvaihteluihin.

5.3 Infrapunaoptinen palonilmaisu

Palamisreaktion kulkuun vaikuttaa voimakkaasti palavan materiaalin määrä, reaktioon osallistuvat aineet ja niiden suhteelliset osuudet, sekä vallitseva lämpötila. Palamisreaktio voi olla luonteeltaan räjähdys, leimahtaminen tai kuumeneminen, joten se voidaan erottaa kohteen emittoiman sähkömagneettisen säteilyn spektrin perusteella. Palamiselle tunnusomainen infrapuna-alueen spektri sisältää yleensä voimakkaita kaasumolekyylien emissiopiikkejä tietyillä aallonpituuksilla, mutta myös kiinteiden aineiden, kuten nokihiukkasten, emittoimaa mustan tai harmaan kappaleen säteilyä laajalla aallonpituusalueella. Palamisen spektriä on verrattu kuvassa 9 kolmeen lämpötilaltaan erilaiseen mustan kappaleen emittoimaan jatkuvaan spektriin. [26] Nokihiukkasten emittoimasta jatkuvasta spektristä voidaan kuvan perusteella karkeasti arvioida palavan kohteen lämpötila, vertaamalla sitä mustan kappaleen säteilyyn ja arvioituun emissiivisyyteen. Optisessa infrapunailmaisussa havainnoidaan tällaista infrapuna-alueen spektriä sekä siinä tapahtuvia muutoksia, ja verrataan niitä normaaliin ympäristön lähettämään infrapunasäteilyn spektriin eli taustasäteilyn aallonpituusjakaumaan. [26] Yleisesti tiedetään, että esimerkiksi yksinkertaisen hiilivedyn palaminen voi sisältää yli 40 erilaista reaktiota liekin eri osissa, joten kaikkien pyrolyysiyhdisteiden ja reaktiossa syntyvien radikaalien emittoimia emissiopiikkejä ei voida erottaa toisistaan tai taustastaan. Kaikkien hiilivety-yhdisteiden palaessa vapautuu ympäristöön kuitenkin aina palamistuotteena nokihiukkasten lisäksi hiilidioksidia ja vettä, mitkä havaitaan selvinä emissiopiikkeinä infrapunaspektrissä. Muita merkittäviä palamistuotteita ovat hiilimonoksidi ja typen eri oksidit. [27]

Kirchhoffin lain mukaan kappaleen emissio ja absorptio esiintyvät samalla aallonpituudella ja niiden intensiteetit ovat yhteydessä toisiinsa: voimakkaat absorptiopiikit tietyillä aallonpituuksilla esiintyvät voimakkaina emission alenemina samoilla aallonpituuksilla. Kaasut ovat infrapunaoptiikan kannalta läpinäkyviä läpi koko spektrikaistan, mutta niillä esiintyy usein voimakkaita absorptiopiikkejä tietyillä aallonpituuksilla. [28] Ilmakehän kaasujen absorptio aikaansaa laajan aallonpituusalueen, missä ilmakehä on infrapunaoptisesti läpinäkyvä. Ilmakehän kaasuista hiilidioksidilla ja vesihöyryllä

on voimakkaimmat infrapuna-alueen absorptiot, joten palamisessa vapautuvan hiilidioksidin ja vesihöyryn emittoiman infrapunasäteilyn absorptio ilmakehässä on Kirchhoffin lain mukaan myös voimakasta. Kaikki kaasut, lukuun ottamatta jalokaasuja ja kaksiatomisia, samanytimisiä kaasuja, absorboivat ja emittoivat infrapunasäteilyä kullekin kaasulle ominaisilla aallonpituuksilla. Muiden, kuin mitattavien kaasujen, häiriövaikutukset voidaan yleensä minimoida tai poistaa valitsemalla havaittavalle yhdisteelle mahdollisimman ominainen aallonpituusalue ja käyttämällä ilmaisimessa riittävän korkeatasoista selektiivistä optiikkaa. [29, 30]



Kuva 9. Normaalin hiilivetyä sisältävän polttoaineen palamisen ja kolmen eri lämpötilassa olevan mustan kappaleen spektriset radianssit aallonpituuden funktiona. Optinen etäisyys on 6 m. [28]

Voimakkaasti infrapunasäteilyä emittoivat pääasiassa hiilidioksidi aallonpituuksilla 2,7 μm, 6,3 μm ja 20 μm ja vesihöyry aallonpituuksilla 2,7 μm, 4,3 μm ja 15 μm, sekä nokihiukkaset laajalla spektrin alueella. [26]. Säteilyn määrä riippuu kaasukerroksen paksuudesta ja kaasujen lämpötilasta. Mitä kuumempi ja paksumpi kerros on, sen suurempi on säteilyn määrä. Kuvassa 9 näkyvä emissiopiikki 4,4 μm:n kohdalla aiheutuu palamisessa vapautuvasta hiilidioksidista. Vesihöyryn emissiopiikki näkyy 2,8 μm:n kohdalla. Palamisessa syntyvän kuuman vesihöyryn emittoima infrapunasäteily absorboituu osittain ilmakehän kylmän vesihöyryn ansiosta. Vaikka Kirchhoffin lain mukaa emissio ja absorptio havaitaan samalla aallonpituudella, niin yleisesti tiedetään, että lämpötilan nousu leventää palamisessa syntyvien kaasujen emissiopiikkiä pidempien aallonpituuksien suuntaan, joten ilmakehässä olevien samojen kaasukomponenttien absorptio havai-

taan taustalla tapahtuvan palamisen emissiospektrissä leventyneen emissiopiikin kaapeampana kolona. Kuvassa 9 näkyvien emissiopiikkien joukossa ja osittain niiden päällä näkyy lisäksi nokihiukkasten emittoimaa mustan tai harmaan kappaleen jatkuvaa säteilyä. [31, 32]

Palamisessa vahvimmat infrapuna-alueen spektriipiikit esiintyvät hiilidioksidilla $4,4\text{ }\mu\text{m:n}$ ja vesihöyryllä $2,8\text{ }\mu\text{m:n}$ kohdalla, joten niitä käytetään usein palon infrapunaoptiseen ilmaisuun. [33]. Sekä hiilidioksidilla että vesihöyryllä on useita spektriipikkejä infrapuna-alueella, mutta kaikkia ei voida tunnistaa luotettavasti ympäristön taustasäteilyn seasta. Tämä johtuu siitä, että ympäristössä olevien kiinteiden kappaleiden ja nesteiden emission spektrinen riippuvuus on vähäistä verrattuna kaasuihin. Tästä syystä niiden emissiospektrin muoto on jatkuvaa ja muistuttaa mustan tai harmaan kappaleen spektriä. [32] Infrapunaoptiset ominaisuudet vaikuttavat paloilmaisimen toimintaan ja luotettavuuteen merkittävästi, koska ilmaisimen optisiin rakenteisiin, väliaineen ilmaseokseen ja palamiseen liittyvien aineiden molekyyliarakenteet aiheuttavat infrapunasäteilyn emissiota tai absorptiota. Infrapunaoptiseen palon linjailmaisuun on tässä työssä käytetty termopinoanturia. Termopinoanturiin on liitetty kaistanpäästösuodatin, mikä on valittu siten, että saadaan haluttu palamisesta vapautuvan kuumen vesihöyryn emittoima $2,8\text{ }\mu\text{m:n}$ säteily määrä havaittua. Ilmaisimen toiminnan kannalta tärkeintä on, että optisissa rakenteissa absorptiota ei tapahdu havaittavan $2,8\text{ }\mu\text{m:n}$ aallonpituuskaisella. Ilmaisimessa olevan termopinoanturin antama jännitesignaalin suuruus riippuu siten $2,8\text{ }\mu\text{m:n}$ kaistalta saapuvan infrapunasäteilyn määrästä ja toisella kanavalla mitatusta taustan säteily määrästä. Näiden säteily määrien suhteen perusteella voidaan päätellä onko kysymyksessä todellinen palo vai häiriö. [34, 35]

5.4 Monikriteeri- ja yhdistelmäilmaisu

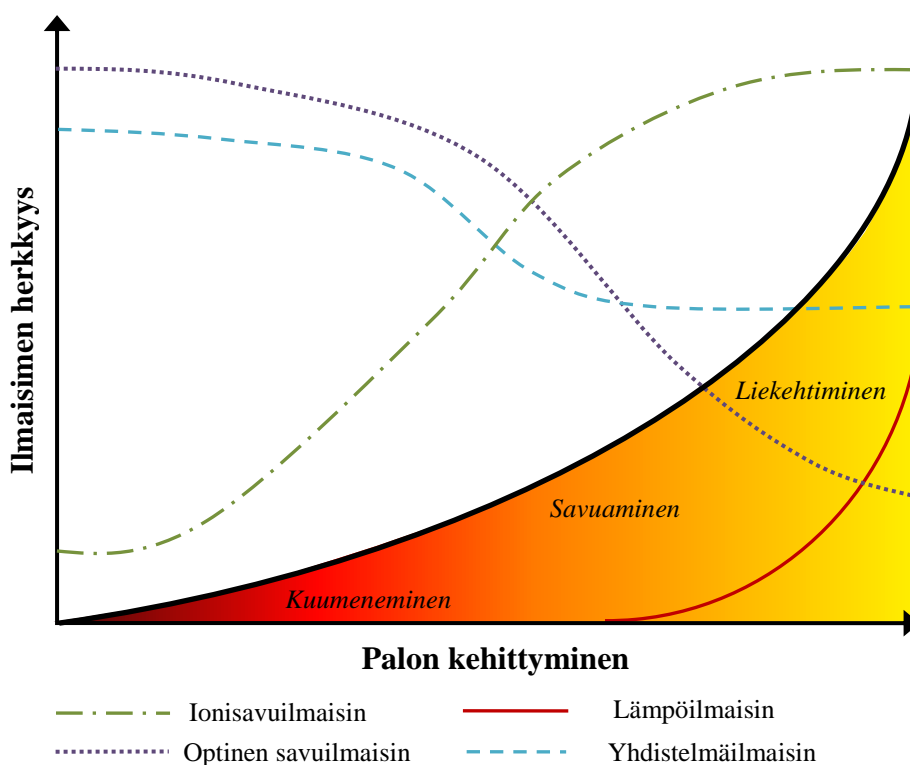
Kehittyneiden signaalianalyysitekniikoiden, kuten sumean logiikan, neuroverkkojen ja monimuuttuja-analyysin, yhdistäminen monikriteeri- ja yhdistelmäilmaisuun tarjoaa monia kehitysmahdollisuuksia palonilmaisutekniikassa. Monikriteeri-ilmaisu perustuu ilmaisimiin, joissa on vähintään yksi sensori, mutta hälytystila perustuu useampaan kuin yhteen kriteeriin. Signaalitason lisäksi niissä voidaan hyödyntää yhden signaalin muutosnopeutta, sekä huomioida kohina ja signaalin mahdollinen epälineaarisuus. [36] Yhdistelmäilmaisu perustuu ilmaisimiin joihin on yhdistetty kahden tai useamman ilmaisintyyppin erilaisten sensorien ominaisuudet ja toiminnot. Yhdistelmäilmaisimiin liitetään usein vielä monikriteeritekniikkaa.

Yhdistelmäilmaisintekniikkaa on kehitetty esimerkiksi Yhdysvaltain laivaston tutkimusohjelmassa. Siinä paloilmaisimet muuntavat tulipalon sivutuotteena syntyvän kemiallisen tai fysikaalisen informaation numeeriseen muotoon. Kukin ilmaisim määrittelee yhden akselin moniulotteisessa avaruudessa. Erityyppiset tulipalot ja muut tapahtumat sijoittuvat pisteiksi tähän avaruuteen ilmaisimien vasteen mukaisesti. Palot, jotka tuottavat samankaltaisen vasteen ilmaisinjoukossa, ryhmittyvät lähelle toisiaan. Monimuuttujamenetelmiin ja numeeriseen analyysiin pohjautuva hahmontunnistus tarkaste-

lee tätä ryhmittymistä ja havainnollistaa moniulotteisen avaruuden pistejoukkojen suhteita. Tämän perusteella määritellään tapahtumatyyppien matemaattiset rajat tulipalojen tunnistamiseksi ja häiriölähteiden erottamiseksi. Prototyypilaitteissa on käytetty ionisaatio-, lämpö-, CO-, CO₂-, kosteus- ja optisten ilmaisimien yhdistelmiä. [37]

Erityisesti erheellisten hälytysten minimoimiseksi on kehitetty yhdistelmäilmaisin, jossa yhdistetään neljä itsenäistä sensoria: hiilimonoksidi-, lämpötila-, infrapuna- ja optinen savusensori. Sensoreiden antamat signaalit käsitellään älykkäillä algoritmeilla, jotka säättävät laitteen ilmaisinprofiilia syötteiden mukaisesti. Ympäristöolosuhteiden muuttuessa ilmaisimen kynnysarvot, vahvistus, aikaviiveet, näytteenottotaajuudet ja keskiarvotus muuttuvat. Jos jokin sensoreista vikaantuu, muiden sensoreiden herkkyys muuttuu, ja laite antaa vikailmoituksen. Kehitystyön lähtökohtana on ollut se, että kaikki palot tuottavat vaihtelevissa suhteissa hiilimonoksidia, lämpöä, hiukkasia ja liekehtivä palo näiden lisäksi muuttuvan valaistuskuvion. Kaikkia näitä ilmiöitä monitoroimalla ja älykästä signaalinkäsittelytekniikkaa käyttämällä on aikaansaatu ilmaisin, joka reagoi nopeasti tulipaloon, mutta ei ole altis häiriötekijöille. [37]

Alla olevan kuvan 10 kuvaajasta nähdään karkeasti erilaisten paloilmaisintyyppien suhteellisia herkkyyksiä. X-akselilla esitetty palon kehittyminen etenee savuamisen kautta kuumenemiseen ja lopulta liekehtivään paloon.



Kuva 10. Paloilmaisintyyppien suhteelliset herkkyydet alkupalosta täyden palamisen vaiheeseen. Yhtenäisen viivan alle jäävä värillinen alue kuvaa palon kehittymistä ja tunnusuuksien muuttumista.

Kuvan 10 perusteella voidaan päätellä, että yhdistelmäilmaisutekniikkaa tarvitaan luotettavaan palonilmaisuun. Luotettavuutta voidaan parantaa myös ilmaisimien kyvyllä

oppia ja analysoida normaaleja ympäristöolosuhteitaan ja suhteuttaa poikkeamat havaintoaineistoon. Lisäksi ilmaisimen nopeuteen voidaan vaikuttaa palon estimoinnilla. Nämä ominaisuudet yhdessä saattavat auttaa havaitsemaan palon alkuvaiheet kuumenemisestä kytämisen kautta savuamiseen toivotulla tavalla. Sovelluskohde määrää tarvitaanko suurta nopeutta vai erittäin suurta tarkkuutta. Uudesta teknologiasta on tietysti vain vähän hyötyä, jos palon alkuvaihetta ei voida havaita tarpeeksi luotettavasti.

6 INFRAPUNAOPTINEN LINJAILMAISINKAAPELI

Mikro-Pulssi Oy:n tutkimushankkeen tarkoituksena oli selvittää uudentyyppisten ja kehitysasteella olevien paloilmainten suorituskyky ja käyttökelpoisuus erilaisten kohteiden palonilmaisussa. Pääasiallisiksi kohteiksi määriteltiin liikennetunnelit, kuljettimet, kaapelikourut ja raskaiden ajoneuvojen moottoritilat. Tällaisten tilojen palosuojaukseen haluttiin tutkia linjailmaisintyyppistä kaapelirakennetta, jonka toiminta pohjautuisi palon termiseen ja infrapunaoptiseen havaitsemiseen sekä digitaaliseen tiedonsiirtoon ja kehittyneeseen signaalinkäsittelytekniikkaan. Paloilmaintyyppinä tämä tarkoittaa lineaarista ei-integroivaa yhdistelmälämpöilmaisinta. Tämä diplomityö on osa yrityksen tutkimushanketta, ja tehtävänä oli osallistua tällaisten ilmaisintyyppeiden suunnitteluun ja rakentamiseen sekä ennen kaikkea niiden testaus- ja mittausjärjestelmän toteuttamiseen. Testaus- ja mittaus tulosten tarkoituksena oli antaa yritykselle tietoa ilmaisintyyppeiden seuraavista ominaisuuksista:

- Tulipalon ilmaisunopeus ja herkkyys
- Ilmaisimen suojavaipan infrapunaoptiset ominaisuudet
- Mekaaninen kestävyys
- Ilmaisimen virhesietoisuus

Tutkimushankkeen lähtökohtana oli aluksi löytää linjailmaisimien termiselle ja infrapunaoptiselle toiminnalle hyvin soveltuvia ja erityisesti korkeita lämpötiloja ja mekaanisia rasituksia kestäviä suojavaippamateriaaleja. Tarkoituksena oli tutkimuksen myöhemmässä vaiheessa testata palokokeilla ilmaisimien suojavaipan ominaisuuksia anturi-elektroniikkaan yhdistettynä. Soveltuvien materiaalien löydyttyä, laadittiin testausjärjestelmä, joka mallintaisi samalla mahdollisimman hyvin edellä lueteltuja linjailmaisimen asennuskohteiden vaatimuksia. Tämän jälkeen suunniteltiin testaukseen soveltuva mittausjärjestelmä tiedonkeruuta varten ja hankittiin materiaalit ja komponentit varsinaisen linjailmaisintyyppeiden rakentamiseen. Lopuksi tehtiin tarkka testaussuunnitelma, minkä mukaan palokokeet haluttiin suorittaa rakennetuille ilmaisintyypeille. Testaussuunnitelman pohjalta testaukset jaettiin kahteen osaan, joista toisessa haluttiin testata resistanssin termiseen lämpötilariippuvuuteen ja monikriteerisyyteen perustuvaa ilmaisintyyppiä ja toisessa infrapunasäteilyn intensiteettiin ja termisen resistanssin yhdistelmäilmaisuuksiin perustuvaa optista ilmaisintyyppiä.

Linjailmaisintyyppeiden testausvaiheiden vaatimat erilaiset tulipalotilanteet synnyttiin sitä varten suunnitellussa ja rakennetussa palokammiossa. Kammioon liitettyjen antureiden ja tiedonkeruulaitteiston avulla mittausdata luettiin kannettavan tietoko-

neen massamuistiin. Mittausdatan lukemiseen käytettiin PC:lle ohjelmoitua graafisella Labview ohjelmointikielellä toteutettua Datalogger virtuaali-instrumenttiä. Tiedonkeruukorttina käytettiin kahdeksalla analogisella mittauskanavalla toimivaa National Instrumentsin NI-USB-6009 mittauskorttia. Mittausdata haluttiin tallentaa mittauskortin A/D muunnoksen jälkeen jokaisesta palokokeesta numeerisena kahdeksan sarakkeisena lämpötila-arvomatriisina PC:n muistiin. Lopputulokseksi haluttiin jokaiseen testaustaapahtumaan liitettyjen mittauskanavien havaitsemien lämpötila-arvojen aikakuvaajat niiden arviointia ja analysointia varten. Testausvaiheisiin ja tiedonkeruuseen palataan yksityiskohtaisemmin luvuissa 7 ja 8.

6.1 Linjailmaisainprototyypit

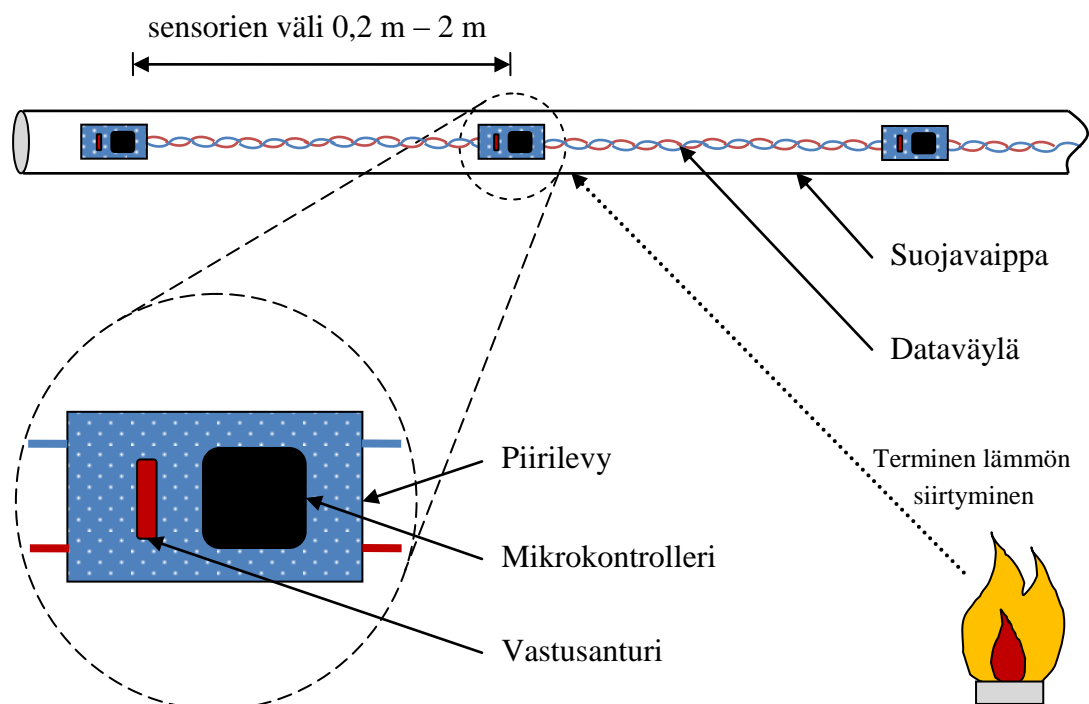
Testauksen kohteina olivat erillisiin lämpötilasensoreihin perustuvat ja digitaaliseen tiedonsiirtoon pohjautuvat optiset lämpöilmaisainprototyypit. Tällaiseen tekniikkaan perustuva ilmaisin voidaan kytkeä teknologiselta tasoltaan aktiiviseen, ohjelmoitavaan ja analysoivaan paloilmoittimeen. Ilmaisimen keskeinen ominaisuus on kyky verrata ympäristössä tapahtuvia muutoksia ilmaisimen muistissa oleviin algoritmeihin. Jotta muutokset havaittaisiin luotettavasti ja analysointiin olisi riittävästi tietoa tarjolla, täytyy ilmaisimen toiminta perustua monikriteeriseen palonilmaisutekniikkaan. Näiden lähtökohtien perusteella toteutettiin kaksi yksinkertaista ilmaisainprototyyppiä. Kappaleessa 6.1.1 on esitelty lämpötila-anturin termiseen lämpöilmaisuuun perustuva ilmaisainprototyyppi ja kappaleessa 6.1.2 termisen lämpötila-anturin ja infrapunaoptisen anturin yhdistelmäilmaisuuun perustuva ilmaisainprototyyppi.

6.1.1 Terminen linjailmaisainprototyyppi

Resistanssin lämpötilariippuvuuteen perustuva ilmaisainprototyyppi on esitelty kuvassa 11. Kuvassa näkyvä ilmaisainprototyyppi muistuttaa ulkonäöltään kaapelia tai taipuisaa putkea, jonka sisällä on tietyin määrävälein piirikortteja. Piirikorttiyksiköiden komponentit ovat pintaliitoskomponentteja, ja yksiköt ovat leveydeltään 6 mm ja pituudeltaan 25 mm. Yksiköt toimivat linjailmaisimen osoitteellisen dataväylän orjalaitteina. Jokainen piirikorttiyksikkö sisältää mikrokontrolleriin yhdistetyn Pt 1000 vastusanturin.

Ilmaisimen reagointi perustuu piirikorttiyksiköllä olevan Pt 1000 vastusanturin termiseen kontaktiin ympäristönsä kanssa. Kuvassa 11 näkyvä lämpölähde luovuttaa lämpöenergiaa ympäröivään tilaan, josta se siirtyy termisesti eli johtumisen ja konvektion vuorovaikutuksesta ilmaisinkaapelin ulkovaippaan kuumentaa sitä ja sen sisällä olevaa ilmaa. Piirikorttiyksiköllä oleva vastusanturi reagoi lämpötilan nousuun. Myös osa lämpölähteestä lähtevästä infrapunasäteilystä lävistää suojavaipan ja absorboituu piirikorttiyksikön materiaaleihin nostaen sen ja sitä ympäröivän ilman lämpötilaa. Lämpötilan nousu aiheuttaa resistanssin muuttumisen vastuksessa, mikä voidaan mitata. Saatu mitaustieto kohonneesta lämpötilasta ja sen nousunopeudesta luetaan mikrokontrolleriin. Ilmaisimen mikrokontrolleriin voidaan ohjelmoida tarvittaessa useita kriteereitä, jotka

täyttyessään aiheuttavan tiedon siirtymisen eteenpäin, vaikka käytössä olisi vain yksi anturi. Mikrokontrollerissa mittaustieto muunnetaan digitaalseksi, ja muokattu data lähetetään eteenpäin paloilmotintkeskukselle varsinaisen palopäätelyn tekemiseksi. Paloilmottimessa oleva paloanalyysiohjelmisto huomioi yksittäisen piirikorttiyksikön tiedon kohonneesta lämpötilasta ja lisää sen ohjelmallisesti ilmaisimen asennuskohteesta laadittuun yksilölliseen laskentamalliin.



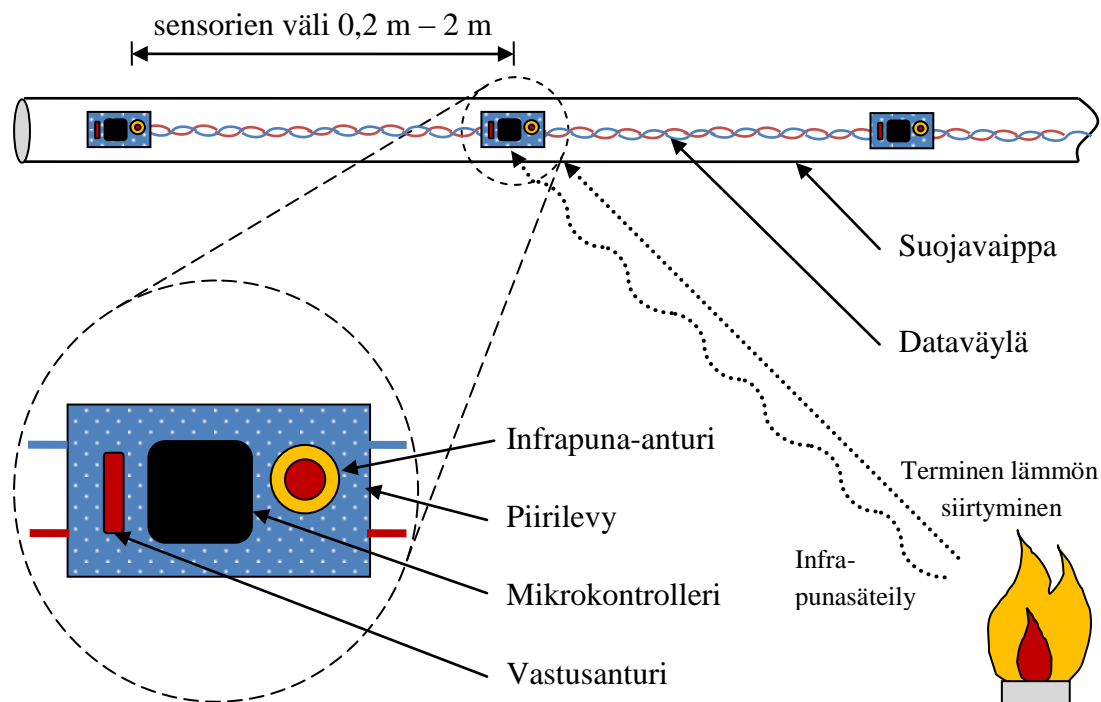
Kuva 11. *Pt1000 vastusanturiin perustuvan monikriteerisen linjailmaisinkaapelin rakenne.*

Piirikorttiyksiköitä yhdistää suojavaippaputken sisällä kierretty parikaapeli, joka mahdollistaa mikrokontrollerin muokkaaman digitaalisen signaalin molempien suuntaisen etenemisen sekä ilmaisinkaapelin piirikorttiyksiköiden välillä että piirikorttiyksiköiden ja paloilmotintkeskuksen välillä. Jokainen piirikorttiyksikkö muodostaa sensorin, minä reagointi voi perustua samoihin tai erillisiin lämpötilaan liittyviin kriteereihin. Kriteerit asetellaan mikrokontrollerin algoritmeihin ja niitä voidaan muuttaa, testata ja säätää ohjelmallisesti paloilmotintkeskuksesta. Sensoreiden välimatkat ilmaisinkaapelissa voidaan valita sovelluskohteesta riippuen 0,2 m – 2 m pitkiä.

6.1.2 Pyrometrinen linjailmaisinprototyyppi

Pyrometrinen linjailmaisinprototyyppi on ulkonäöltään ja toteutukseltaan muuten samanlainen kuin edellä esitelty terminen linjailmaisinprototyyppi, mutta piirikorttiyksiköille on lisätty infrapunasäteilyä mittaava anturi. Infrapunasäteilyn määrää mitataan nelikanavaisella tai kahdella kaksikanavaisella termopinoanturilla, missä kaksi kanavaa

mittaa koko aallonpituusalueita eri vahvistuksien arvoilla, ja kaksi muuta kanavaa mittaa $2,8\ \mu\text{m}$ kaistanpäästösuodatettua infrapunasäteilyn määrää eri vahvistuksien arvoilla. Termopinoanturin ja Pt 1000 platinavastusanturin yhteiskäytön on tarkoitus antaa tälle linjailmaisinprototyypille yhdistelmäilmaisun vaatimat perusominaisuudet. Pyrometrinen linjailmaisinprototyyppi on esitelty kuvassa 12.



Kuva 12. Termopinoanturin ja Pt 1000 vastusanturin yhdistelmäilmaisuuun perustuva linjailmaisinkaapelin rakenne.

Termopinoanturi mittaa pyrometrisesti siihen saapuvaa infrapunasäteilyn intensiteettiä, minkä lämpölähte emittoi palaessaan. Mittausalue eli aallonpituusalue voidaan valita termopinoanturin optiseen rakenteeseen lisättävien suodatinelementtien ja suojalinssien avulla [38]. Kun infrapunasäteilyn intensiteettiin verrannollinen lukuarvo tai lukuarvon muutos tunnustetaan mikrokontrolleriin asetettujen kriteerien perusteella palolle selkeästi tunnusomaiseksi, lähettää piirikorttiyksikkö nopeasti tiedon paloilmotintokeskukselle. Riippuen asetelluista kriteereistä, voi kontrolleri jäädä vielä odottamaan samalla piirikorttiyksiköllä olevan hitaammin reagoivan vastusanturin mittaustietoa, lähettääkseen varmemman yhdistelmäilmaisuuun perustuvan tiedon paloilmotintokeskukselle. Tällainen ilmaisinsprototyyppi reagoi sekä lämpölähteen tuottamaan termiseen lämpöön että lämpölähteen emittoimaan infrapunasäteilyyn.

6.2 Linjailmaisimen suojavaippa

Linjailmaisins-tutkimushankkeen tarkoituksena oli myös löytää ja testata ilmaisimeen mahdollisimman hyvin soveltuvia suojavaippamateriaaleja. Tärkeimmiksi ominaisuuks-

siksi suojavaipalle asetettiin sen termiset ja infrapunaoptiset ominaisuudet. Suojavaipan tulisi kestää esimerkiksi ajoneuvojen moottoritilojen vaihtelevia lämpötilaolosuhteita, sekä toimia tulipalotilanteessa mahdollisimman pitkään vioittumattomana. Tulevat käyttökohteet, kuten kuljetinradat ja moottoritilat, vaativat suojavaipalta myös hyvää mekaanisten rasitusten ja kemiallisten aineiden kestävyyttä. Suojavaipan sisällä olevat lämpötila-anturit vaativat lisäksi suojavaipalta hyvää infrapunasäteilyn läpäisykykyä. Koska suojavaippa toimii linjailmaisimen uloimpana optisena osana, sen pinnan tulisi olla myös likaa hylkivä. Suojavaipan sisään asennettujen antureiden ja muun elektronikan vuoksi, täytyisi suojavaipalla olla myös hyvin pieni kaasujen ja nesteiden suotokyky elektronikan ja optiikan moitteettoman ja pitkäikäisen toiminnan turvaamiseksi. Ilmaisimen mahdollisen tuotantovaiheen vaatimukset kohdistuisivat lisäksi materiaalin saatavuuteen, työstettävyyteen ja asennettavuuteen, unohtamatta kustannustekijöitä.

6.2.1 Suojavaippamateriaalit

Kaikkien edellä kuvattujen linjailmaisimen suojavaippaan kohdistuvien vaatimusten yhdistäminen johti lopulta materiaalien valinnoissa polymeereihin ja silikonikumiin. Polymeerimateriaaleista kiinnostus kohdentui varsinkin korkeita lämpötiloja kestäviin ja hyvin infrapunasäteilyä läpäiseviin fluoropolymeereihin. Sekä fluoropolymeereillä että silikonikumilla on edellisten ominaisuuksien lisäksi ylivoimaiset kyvyt hylkiä likaa, joka on kaapelilinjailmaisimelle tärkeä ominaisuus. Suojavaippamateriaalit haluttiin tilata prototyypin testausta varten halkaisijaltaan ja seinämävahvuudeltaan erilaisina putkina, joiden sisään testausvaiheessa piirilevy ja piirilevyllä oleva anturielektroniikka asennettaisiin. Lopulta päädyttiin hankkimaan kuusi erilaista testattavaa suojavaippaputkea, jotka erosivat toisistaan neljän eri materiaalin suhteen ja kahden materiaalin osalta myös kahden eri seinämävahvuuden suhteen. Tilatuista ja testaukseen valituista suojavaippamateriaaleista tunnetuin on PTFE (polytetrafluorieteeni), mistä käytetään kaupanimeä Teflon®. Muut fluoropolymeerit olivat FEP (fluorieteenipropeeni) ja PFA (perfluorialkoksi). Lisäksi testattavien suojavaippamateriaalien joukkoon valittiin silikonikumi. Silikonikumin lämpömekaaniset ominaisuudet, verrattuna fluoropolymeereihin, tiedettiin etukäteen huomattavasti heikoimmiksi. Silikonikumi valittiin testattavien materiaalien joukkoon ennen kaikkea vertailun, mutta myös hyvien optisten ominaisuuksiensa ansiosta. Prototyyppien testauksen myöhemmissä vaiheissa keskityttiin pääasiassa vain kolmeen eri halkaisijaltaan ja seinämävahvuudeltaan olevaan fluoropolymeeriin.

6.2.2 Fluoropolymeerit

Amerikkalainen Dupont yhtiö kehitti fluoropolymeerisen materiaalin toisen maailmansodan aikana strategiseksi materiaaliksi, ja sitä käytettiin aluksi ydinaseteknologiassa. Fluoropolymeerien käyttökelpoisuus perustuu siihen, että ne ovat puhtaita materiaaleja, ja ne ovat lämpö- ja kemiallisilta ominaisuuksiltaan inerttejä. Niihin ei vaikuta aika,

otsoni, happi tai UV-valo kovinkaan merkittävästi. Fluoropolymeerit kestävät erittäin hyvin happoja ja emäksiä myös korkeissa lämpötiloissa. Niillä on myös erinomainen sähköneristyskyky ja erityisen pieni kitkakerroin, ja ne ovat kohtuullisen lämpötilastabiileja materiaaleja. Myös dielektrisyysominaisuudet ovat erinomaisia riippumatta käytettävästä taajuudesta tai vallitsevasta lämpötilasta. Fluoropolymeerit koostuvat vahvoista hiilifluoriyhdisteistä sekä fluoriatomien täysin peittämistä hiiliketjuista, minkä ansiosta ne kestävät lähes kaikkia kemikaaleja. Hiilen ja fluorin välinen sidosenergia on erittäin suuri, mutta ketjujen välinen sidosenergia on erittäin pieni. Esimerkiksi alle 300 °C lämpötilassa mikään aine ei liuota PTFE:tä ja pyrolyysi alkaa noin 440 °C lämpötilassa ja on merkittävää 540 °C lämpötilassa. Fluoropolymeerit ovat kestumuoveja eli termoplastisia polymeerejä, vaikka niistä PTFE käyttäytyy prosessoitaessa kertamuovien eli termoelastisten polymeerien tavoin. PTFE:n pitkät molekyyliketjut estävät materiaalin plastisoitumisen kuumennettaessa, mikä johtuu PTFE:n suuresta moolimassasta, ketjun jäykkyydestä ja korkeasta kiteisyydestä [39]. PTFE:n prosessoitavuus on tästä syystä huono, joten materiaalin liimaus ja hitsaaminen on hankalaa. PTFE:stä onkin kehitetty muita fluoropolymeerejä, kuten FEP ja PFA, joissa on kyetty säilyttämään useimmat PTFE:n hyvät ominaisuudet ja saatu materiaalin työstäminen helpommaksi. Niiden ominaisuudet ovat muuten samanlaiset kuin edellä kuvatun PTFE:n, mutta niitä voidaan sulattaa, venyttää, kuumasaumata ja myös ruiskupuristaa. [40].

Koska fluoropolymeereillä happi-indeksi (96 %) on suurempi kuin ilman (21 %), ne ovat normaaliolosuhteissa itsestään sammuvia, ja soveltuvat siten erittäin hyvin paloilmaisen rakennemateriaaleiksi. Happi-indeksi on suure, joka kuvaa happipitoisuuden vaikutusta palon leviämiseen kiinteässä kappaleessa. Happi-indeksiä käytetään muovien syttyvyyden testaamisessa. Aineen happi-indeksi mitataan standardin ASTM D 2863 mukaan yhden ilmakehän paineessa ja virtaavassa hapen ja typen seoksessa. Indeksillä määritetään siten alhaisimman liekehtivää palamista ylläpitävän happipitoisuuden eli LOI-indeksin (engl. Limiting Oxygen Index) [41]. LOI eli happi-indeksi ei ole kuitenkaan sama kuin rajahappipitoisuus LOC (Limiting Oxygen Concentration), jolla tarkoitetaan alinta happipitoisuutta, missä tietty kaasu voi muodostaa syttyvän seoksen. Mitä suurempi happi-indeksi materiaalilla on, sitä vaikeammin materiaali syttyy ja palaa [41]. Lämpötilan tai paineen noustessa happi-indeksi pienenee. Happi-indeksin perusteella ei voida kuitenkaan varmuudella ja tarkasti sanoa millä hapen pitoisuuksilla materiaali palaa. Tästä johtuen happi-indeksin yleistettävyys on huono, ja se on vain varauksin sovellettavissa. Voidaan kuitenkin varmuudella sanoa että fluoropolymeerit eivät ylläpidä palamista. [42]

6.2.3 Fluoropolymeerien spektroskopiaa

Polymeerien infrapunasäteilyn läpäisevyys eli transmittanssi muuttuu aallonpituuden muuttuessa ja on suhteessa materiaalin paksuuteen. Ohut polymeeri läpäisee säteilyä enemmän kuin paksu. Useat polymeerit, mutta ennen kaikkea fluoropolymeerit, ovat tunnetusti hyvin infrapunasäteilyä läpäiseviä laajalla aallonpituusalueella. Ne koostuvat

kuitenkin moniatomisista molekyyleistä, joten niillä esiintyy myös tietyillä infrapuna-alueen aallonpituuksilla molekyyლისidosten värähtelyabsorptioita. Linjailmaisimen testaukseen valittujen kolmen fluoropolymeerin PTFE:n, FEP:n ja PFA:n kirjallisuudessa esitetyistä spektreistä käy ilmi, että niillä on hyvin samankaltainen spektriprofiili ja absorptiota ei esiinny ilmaisimelle tärkeällä 2,8 μm :n aallonpituudella. Kaikilla fluoropolymeereillä on kuitenkin absorptiopiikki 4,2 μm :n kohdalla, joka johtuu fluoropolymeerien CF_2 molekyyლისidoksen asymmetrisestä ja symmetrisestä venytysvärähtelystä. Myös 5,3 μm :n kohdalla, sekä 7,1 μm :n ja 10 μm :n välissä, esiintyy kaikilla fluoropolymeereillä absorptiota. [43]

7 TESTAUS- JA MITTAUSLAITTEISTO

Infrapunaoptisten linjailmaisiprotyyppien termiset ja infrapunaoptiset ominaisuudet haluttiin testata kokeellisesti, ennen kuin yritys tekisi niitä koskevia jatkokehityssuunnitelmia. Ominaisuudet haluttiin testata palokokeilla, joista kerättyjen mittaustuloksien avulla saataisiin tietoa prototyypin ilmaisukykyä ajan ja palamisen luonteen suhteen. Palamisen luonteen vaikutukset haluttiin selvittää kytevien ja liekehtivien palokokeiden avulla. Lisäksi haluttiin tietoa prototyypin soveltumisesta liikkuvan palon ilmaisuun. Näiden asioiden selvittämiseksi toteutettiin testaus- ja mittauslaitteisto, mikä koostui palokammioista ja siihen liitetystä anturielektroniikasta sekä tiedonkeruulaitteistosta ja mittausohjelmistosta. Tässä kappaleessa on yksityiskohtaista tietoa prototyypin testaus- ja mittauslaitteistosta, testaustestausmenettelystä ja varsinaisista testauksista.

7.1 Testausympäristö

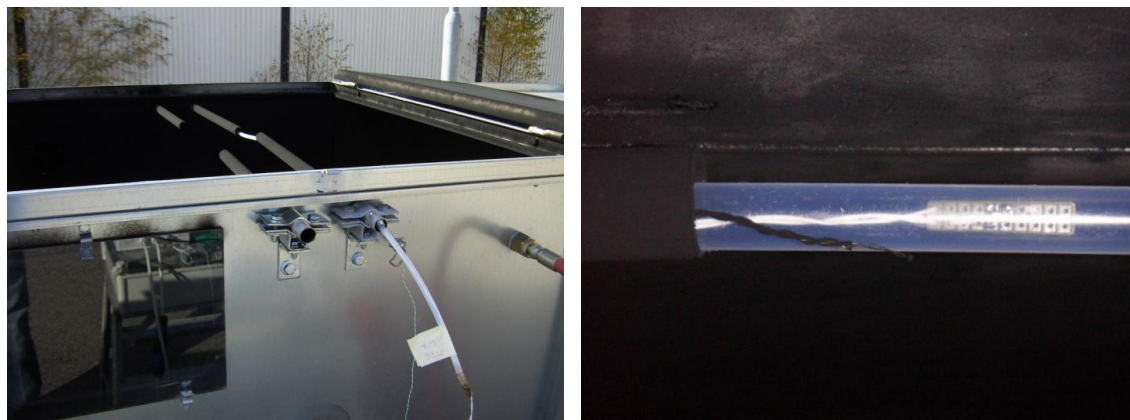
Ilmaisiprotyyppien testauksia varten suunniteltiin palokammio, joka palvelisi mahdollisimman hyvin näitä ja mahdollisesti myös yrityksen tulevia palokokeita. Palokammion tarkoituksena oli mallintaa mahdollisimman hyvin raskaan ajoneuvon moottoritalaa sekä teollisuuden umpinaista kuljetinrataa. Suunnittelussa päädyttiin näiden lähtökohtien perusteella laajennettavissa olevaan palokammioon. Palokammio on esitelty kuvassa 13.



Kuva 13. Palokokeissa käytetty testaus- ja mittauslaitteisto. Vasemmalla palokammio on koottu 1 m³:n tilavuiseksi. Oikealla palokammio on koottu 3 m³:n tilavuiseksi ja pohjalle asennettu kuljetinratakisko liikkuvalla lämpölähteelle.

Palokammio rakentui 14:sta erillisestä galvanoiduista pellistä valmistetusta yhden neliömetrin elementistä. Kolmeen elementtiin oli tehty saranoidut luukut helpottamaan

mittausjärjestelyitä. Pellin paksuus oli yksi millimetri, ja elementtien runkona oli L-profiilista hitsattu teräskehikko. Kammio oli mahdollista koota kuudesta elementistä yhden kuutiometrin tilavuiseksi kopiksi, kun sen haluttiin mallintavan raskaan ajoneuvon suljettua moottoritilaa (kuva 13 vasemmalla). Kuljetinrataa mallinnettaessa kammio laajennettiin molemmista päädyistään kahdeksan lisäelementin avulla kolmen kuutiometrin tilavuiseksi putkeksi, ja sen pohjalle asennettiin lisäksi U-profiilista tehty kolme metriä pitkä kuljetinratakisko liikkuvia palokokeita varten (kuva 13 oikealla). Palokammion seinämään porattiin tulo- ja poistoilma-aukot palamisen ylläpitämiseksi, sekä leikattiin pienehkö ikkuna, jonka lävitse otettiin videokuvaa testausten aikaisesta palotapahtumasta. Kammion yläosaan kiinnitettiin testattaville linjailmaisinprototyypeille teline. Teline oli keskeltä poikki oleva 1,2 metrin mittainen alumiiniputki, jonka avointa osaa pystyttiin säätämään. Alumiiniputken halkaisija oli 20 mm, ja se säädettiin keskeltä auki 20 cm:n pituudelta. Testattavat linjailmaisinprototyypit työnnettiin vuorollaan alumiiniputken sisään testaukseen kuuluvia palokokeita varten. Teline ja testattava ilmaisinsinprototyyppi on esitelty kuvassa 14.



Kuva 14. Vasemmalla: testattava ilmaisinsinprototyyppi on kiinnitetty palokammion telineeseen. Oikealla: Piirilevy on testattavan PFA suojavaippaputken sisällä sekä K-tyypin termopari sen ulkopuolella.

Erilaiset palokokeet, kuten liekehtivä palaminen ja kytevä punahehkuinen hiillos, synnytettiin palokammion pohjalla olevassa polttomaljassa. Palokokeet tehtiin kolmessa mittaussarjassa. Polttomalja oli ensimmäisessä ja toisessa mittaussarjassa paikallaan ja liikkui kolmannessa mittaussarjassa sille rakennettua rataa pitkin (kuva 13 oikealla). Turvallisuuden ja suuren kokonsa vuoksi palokammio oli mittausten aikana ulkona, ja siihen oli asennettu kiinteä hiilidioksidisammutin. Palokammioon asennettujen antureiden ja tiedonkeruujärjestelmän kaapeleihin tehtiin asianmukaiset ja käytännölliset liittimet, jotta mittauselektroniikka voitiin nopeasti kytkeä irti palokammioista. Liittimet asennettiin myös sen vuoksi, että tiedonkeruujärjestelmää voidaan myöhemmin muokata ja yhdistää yhtiön muihin testaussovelluksiin.

7.2 Testausten kohde ja tavoitteet

Testausten tarkoituksena oli selvittää palokokeilla linjailmaisiprotyyppien suojavaippojen infrapunaoptiset, termiset ja mekaaniset ominaisuudet ja niiden sisällä olevan anturielektroniikan käyttökelpoisuus ja luotettavuus erivaiheisen palon ilmaisussa. Testauksista saatavien mittaustuloksien avulla voidaan lopulliseen linjailmaisimeen suunnitella myöhemmin kriteeristö lämpötila-antureiden reagointinopeuksien ja herkkyyksien avulla, sekä valita oikea suojavaippa lämmönsiirto-ominaisuuksien perusteella. Ennakkovalintojen perusteella päädyttiin testaamaan neljää erilaista suojavaippamateriaalia. Testauksia varten valitut suojavaipat hankittiin 1,5 metrin pituisina putkina. Tarkoituksena oli myös selvittää suojavaippaputkien sisähalkaisijoiden ja seinämäpaksuuksien merkitys mittaustuloksiin, joten testattavia putkia hankittiin sen vuoksi yhteensä kuusi. Testaukset tehtiin kolmessa mittaussarjassa siten että viimeiseen mittaussarjaan valikoituisi vain yksi testattava suojavaippaputki.

Ensimmäisessä mittaussarjassa testattiin kuuden erilaisen ilmaisinprototyypin valitun suojavaippaputken termisiä lämmönsiirto-ominaisuuksia platinavastusanturiin Pt 1000 perustuvien mittausten avulla. Testattavina materiaaleina olivat silikonikumi, FEP, PFA ja PTFE. Silikonikumiputken sisähalkaisija oli 7 mm ja seinämäpaksuus 2,5 mm. FEP putken sisähalkaisija oli 6 mm ja seinämäpaksuus 1 mm. PFA putkia oli testattavana kaksi kappaletta ja niistä toisen sisähalkaisija oli 6 mm, toisen 10 mm ja molemmilla oli 1mm seinämäpaksuus. PTFE putkia oli myös kaksi kappaletta. Toisella PTFE putkella oli 6 mm sisähalkaisija ja 0,5 mm seinämäpaksuus ja toisella putkella oli 12 mm sisähalkaisija ja 1 mm:n seinämäpaksuus. Testaukset tehtiin ensimmäisessä mittaussarjassa pelkästään liekehtivälle palolle.

Toisessa mittaussarjassa selvitettiin ilmaisinprototyyppien suojavaippamateriaalien infrapunasäteilyn läpäisyominaisuuksia. Näihin testauksiin valittiin kolme, ensimmäisen mittaussarjan perusteella parhaiten selviytynyttä suojavaippaputkea. Infrapunasäteilyn mittaamiseen käytettiin termopinoanturia. Testaukset tehtiin myös liekehtivälle palolle, mutta mittaussarjan parhaiten infrapunasäteilyä läpäisevälle materiaalille tehtiin vielä ylimääräinen testaus kolminkertaisella polttoainemäärällä verrattuna normaaliin. Sekä ensimmäisen että toisen mittaussarjan liekehtivän palon testauksissa käytettiin polttoaineena N-heptaanin ja 5 %:n tolueenin seosta. Liekehtivästä palosta haluttiin tallennettua mittaustietoa palamisen kolmesta päävaiheesta: alkupalosta, täyden palamisen vaiheesta ja liekin hiipumisesta.

Kolmannessa mittaussarjassa testattiin kuinka ilmaisinprototyypin platinavastusanturi ja termopinoanturi soveltuvat yhdistelmäilmaisuun liikkuvan liekehtivän ja liikkuvan kytevä palon havaitsemisessa. Testauksissa testiradan liikkuvana polttoaineena oli N-heptaani ja 5 %:n tolueeniseoksen lisäksi kytevä hiillos. Testattavaksi suojavaippamateriaaliksi selviytyi tähän viimeiseen mittaussarjaan ainoastaan yksi suojavaippamateriaali, joka valittiin toisen testaussarjan mittaustulosten perusteella. Palokokeiden lisäksi tehtiin vielä yksi testaus auringon suoralle säteilylle. Auringon emittoiman säteilyn spektri on tietyiltä osin hyvin lähellä lämpötilaltaan 5800 °C olevan mustan kapp-

leen emittoimaa säteilyn spektriä. Auringon säteily on usein häiriölähteenä paloilmaisimille, joten sitä on hyvä verrata palamisesta emittoituneeseen infrapunasäteilyyn häiriöiden eliminoinemiseksi.

7.3 Testausmenettely

Testauksia varten laadittiin noin 50 kohtaa sisältävä testauslomake (Liite 2), mihin ennen testausten alkua kirjattiin ylös kaikki tärkeimmät yksityiskohdat ja lähtöarvot jokaisesta yksittäisestä testauksesta. Lomakkeeseen kirjoitettiin aika, ulkolämpötila, testattava materiaali ja sen mitat, poltettava aine ja sen määrä, tiedonkeruukortin näytteenottoaajuus sekä anturikohtaisten mittalähettimien kanavakohtaiset vahvistukset ja offset-jännitteet. Lisäksi lomakkeeseen merkattiin kaikkien antureiden ja palokammioon liittyvän muun mittauskaluston tarkat paikat X-, Y-, Z-koordinaatteina. Koordinaatiston origo kiinnitettiin palokammion etuseinän vasempaan alakulmaan. Testauslomake toimi samalla mittausten tarkastuslistana estäen erehdysten ja sekaantumisten vaaran eri mittauskerroilla. Testauslomake mahdollistaa myös testausten toistettavuuden, jos siihen myöhemmin olisi tarvetta.

Ennen varsinaisia testaukseen kuuluvia palokokeita palokammio koottiin ensimmäistä ja toista testaussarjaa varten yhden kuutiometrin tilavuiseksi, ja siinä olevat 100 mm halkaisijaltaan olevat ilmanvaihtoventtiilien lautaset pyöritettiin 20 mm auki ja lukittiin venttiilissä olevan lukitusmutterin avulla. Palokammion pohjalle asennettiin kahdesta valurautalevystä ja 2 kW lämmitysvastuksesta tehty lohko (kuva 15), joka lämmitettiin 90 °C:een.



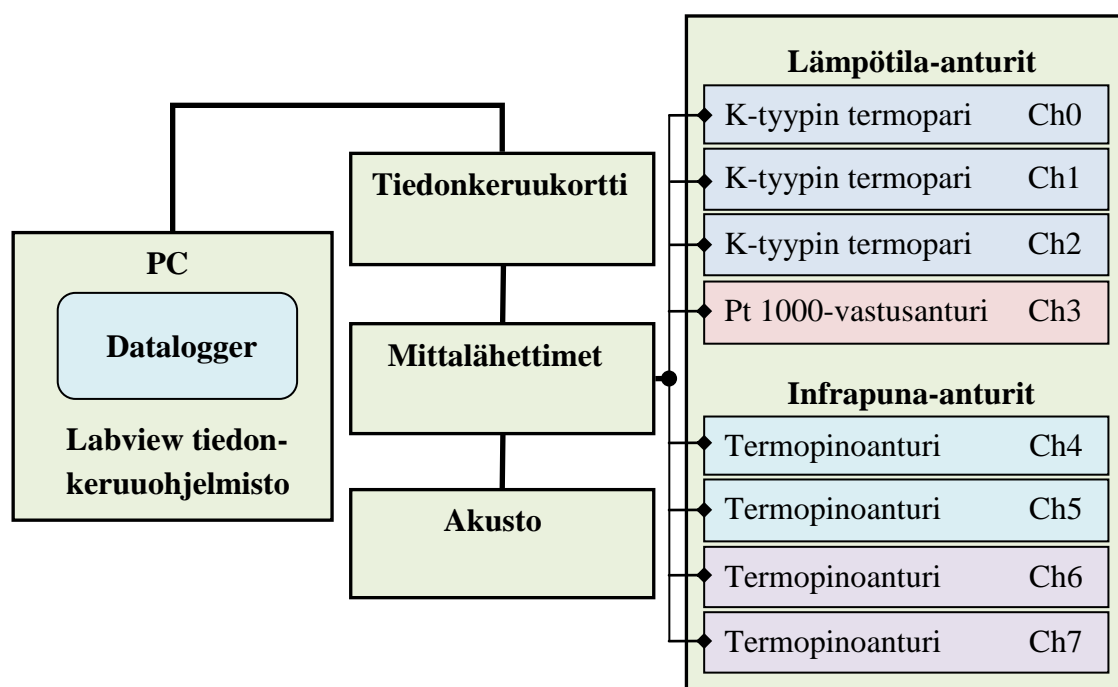
Kuva 15. Palokammion pohjalle sijoitettu lohko ja polttomalja.

Palokammion pohjalle asetettiin lisäksi 125 mm halkaisijaltaan oleva polttomalja (kuva 15), johon kaadettiin mittauksissa käytettävää N-heptaanin ja 5%-tolueenin seosta 50

millilitraa. Maljaan kaadettu aine sytytettiin ja kammion luukut suljettiin palon ajaksi. Tämä toimenpide toistettiin varmuuden vuoksi kolme kertaa, kunnes todettiin, että kammion sisäpuolella oleva kirkas pelti oli tasaisen musta ja nokinen. Toimenpide esti liiallisen emissiivisyyden muutoksen testausten aikana.

7.4 Mittauslaitteisto

Mittauslaitteisto koostui edellisissä kappaleissa kuvatun palokammion ja siihen kiinnitettyjen lämpötila-anturien lisäksi mittalähettimistä, jännitelähteistä, tiedonkeruukortista ja kannettavasta tietokoneesta sekä siihen asennetusta tiedonkeruuohjelmistosta. Mittauslaitteistosta on esitetty periaatekaavio alla olevassa kuvassa 16 ja kaksi valokuvaa sivulla 55 (kuva 19).



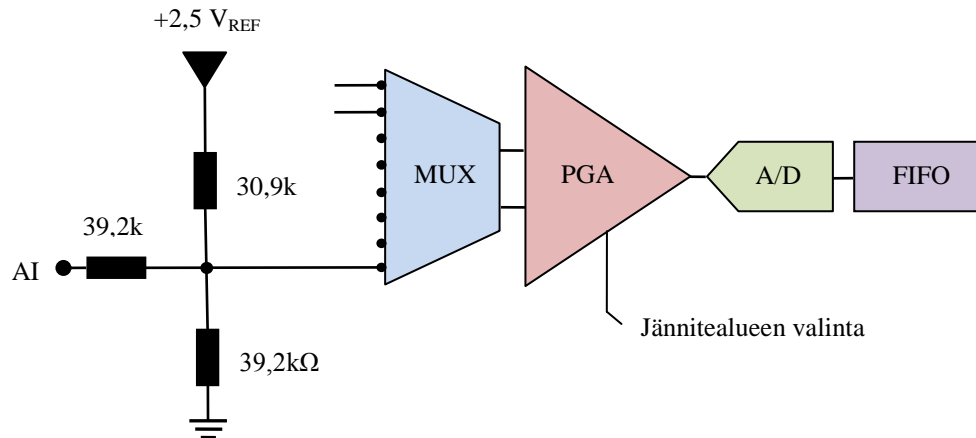
Kuva 16. Mittauslaitteiston periaatekuva.

Kuvassa 19 on esitelty mittauslaitteistoon kuuluvat lämpötila-antureiden mittalähettimet ja tiedonkeruukortti (ylempi suojakotelo), akusto mittalähettimien tarvitsemaa 24 V käyttöjännitettä varten (alempi suojakotelo) ja tiedonkeruuseen käytetty PC.

7.4.1 Tiedonkeruukortti

Mittauksissa käytettiin tiedonkeruukorttina National Instrumentsin valmistamaa ja USB väylään liitettävää NI-USB6009 mittauskorttia. Kortissa on kahdeksan analogista sisääntulokanavaa, kaksi analogista ulostulokanavaa ja 12 digitaalista I/O kanavaa. Tiedonkeruukortin suurin näytteenottotaajuus on 48 kS/s, ja sen erotuskyky on 14 bittiä. Näissä mittauksissa käytettiin kaikkia kahdeksaa analogista sisääntulokanavaa, joista

neljä kanavaa varattiin termisille lämpötila-antureille ja 4 optisille infrapuna-antureille. Kuvassa 17 on esitetty kaaviokuva tiedonkeruukortin analogisten sisääntulojen (AI) kytkeytymisestä. Näytteenotto suoritetaan tiedonkeruukortissa kaikille kanaville samalla näytteenottotaajuudella, vaikka kortin ohjelmakoodilla sitä voidaan muuttaa kanavakohtaisesti.



Kuva 17. Tiedonkeruukortin analogisten sisääntulojen kytkeytyminen.

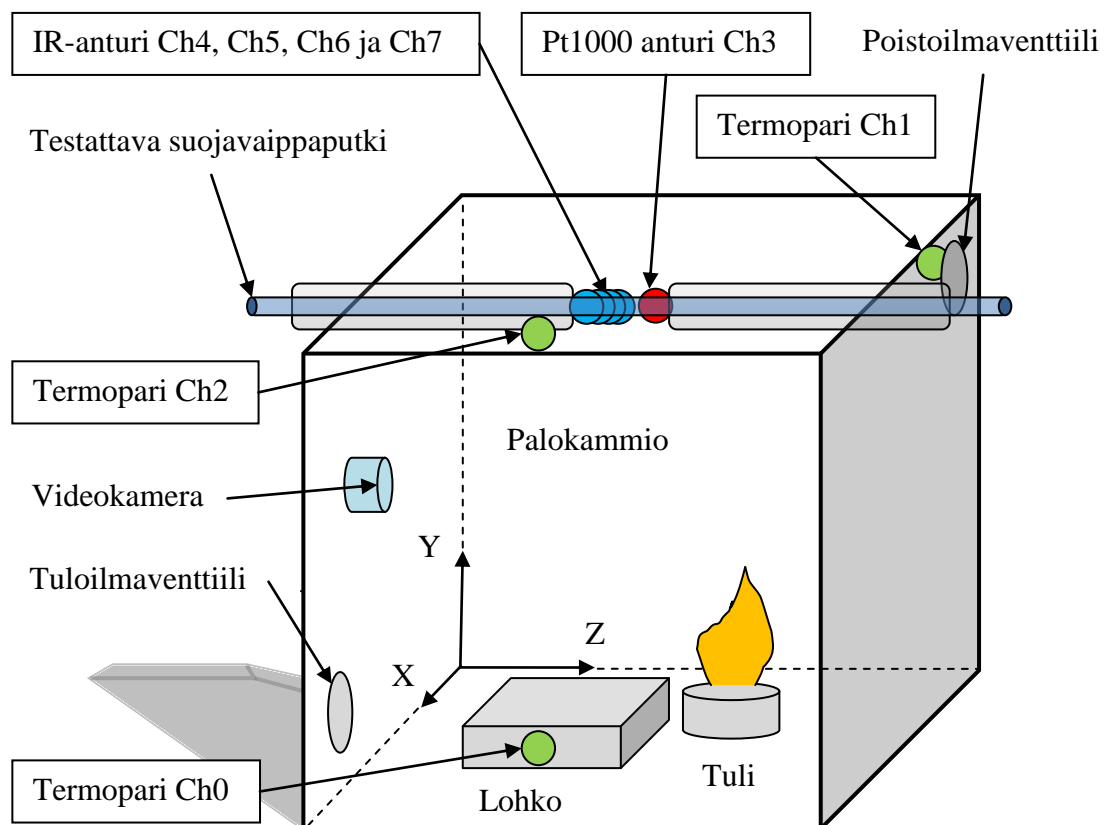
Yhden A/D muuntimen vuoksi analogiset sisääntulot multipleksoidaan ennen A/D muunnosta. Multiplekserin (MUX) tehtävänä on yhdistää kahdeksan analogisen kanavan mittaussignaaleista yksi signaali kerrallaan A/D muuntimelle. Multiplekserin ja A/D muuntimen välissä oleva PGA lohko (engl. programable gain amplifier) on säädettävissä oleva vahvistin. Vahvistus voi saada arvoja 1, 2, 4, 5, 8, 10, 16 tai 20, jos mittauskytkennäksi valitaan differential-mode. Näissä mittauksissa mittauskytkennäksi valittiin single-ended-mode, jolloin vahvistus voi saada vain arvon 1. PGA lohko valitsee automaattisesti vahvistuksen jännitealueen valinnan perusteella. Tiedonkeruukortin FIFO (engl. first-in-first-out) lohko siirtää puskuriin mittausdataa tiedonkeruun aikana. Puskurista mittausdata luetaan sisääntulojärjestyksessä USB väylän kautta tietokoneen muistiin. [44]

7.4.2 Antureiden sijoittelu

Mittauksissa käytettiin kolmea PTFE-päällysteistä K-tyyppin termoparia, yhtä Pt 1000 platinavastusanturia ja yhtä nelikanavaista termopinoanturia. Lämpötila-anturit asennettiin siten, että kolme termoparia mittasi palokammion sisällä olevaa testausympäristön lämpötilaa, ja platinavastusanturi ja nelikanavainen termopinoanturi mittasivat testattavan linjailmaisinprototyypin suojavaipan termisesti ja säteilemällä läpäissyttä lämpöä. Termoparit kytkettiin kahdeksankanavaisen tiedonkeruukortin kolmelle ensimmäiselle analogiselle sisääntulokanavalle Ch0, Ch1 ja Ch2. Platinavastusanturi kytkettiin tiedonkeruukortin kanavalle Ch3 ja nelikanavainen termopinoanturi kytkettiin tiedonkeruukortin neljälle viimeiselle kanavalle Ch4, Ch5, Ch6 ja Ch7. Termopinoanturin kanavat Ch4 ja Ch5 mittasivat testauksissa lämpölähteen lähettämää infrapunasäteilyn koko kaistaa,

mutta eri vahvistusten kertoimilla. Kanavat Ch6 ja Ch7 mittasivat infrapunasäteilyä myös eri vahvistusten kertoimilla, mutta niille asennettiin lisäksi 2,8 mikrometrin kaistanpäästösuodattimet.

Antureiden sijoittelu on esitetty kuvassa 18. Kanavalla Ch0 oleva termopari oli kontaktissa palokammion pohjalla olevaan esilämmitettyyn valurautalohkoon. Vastuksella (2 kW) esilämmitetyn valurautalohkon tarkoitus oli mallintaa ajoneuvon käyntilämpöistä moottoria. Kanavan Ch1 termopari kiinnitettiin palokammion yläkulmaan poistoilmaventtiilin läheisyyteen. Sen tarkoituksena oli mitata poistuvien palokaasujen lämpötilaa. Tämän paikan ajateltiin ennakkoon olevan palokammion kuumin paikka. Kanavaan Ch2 kytketyn termoparin tarkoituksena oli toimia referenssianturina ilmaisinprototyypin suojavaippaputken sisällä olevalle lämpötilan mittaukselle, joten se oli asennettu testattavan suojavaippaputken välittömään läheisyyteen. Termopari kiinnitettiin tästä syystä testattavan ilmaisinprototyypin telineeseen, mikä sijaitsi keskellä palokammion yläosaa. Termoparin liitospää taivutettiin tämän jälkeen puolen senttimetrin päähän ilmaisinprototyypin suojavaipasta, kuten kuvasta 14 nähdään.



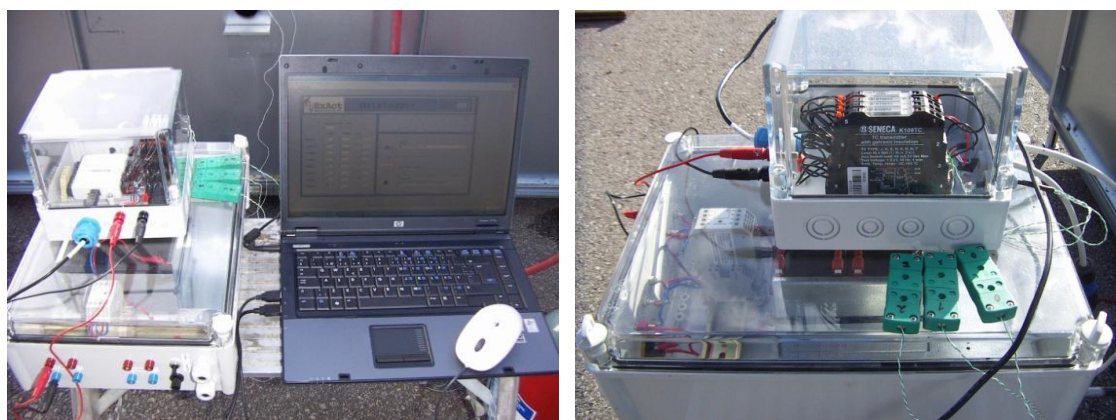
Kuva 18. Antureiden sijoittelu palokammiossa.

Kanavaan Ch3 kytketty platinavastusanturi oli testausten aikana testattavan ilmaisinprototyypin suojavaipan sisäpuolella pieneen piirilevyyn juotettuna. Anturin tarkoituksena oli mitata kuinka hyvin terminen lämpötilan nousu näkyy suojavaippamateriaalien sisä-

puolella. Kanaviin Ch4, Ch5, Ch6 ja Ch7 liitettiin neljäkanavainen termopinoanturi. Termopinoanturilla oli tarkoitus mitata suojavaippamateriaalin lävistämää lämpötilaan verrannollista infrapunasäteilyn intensiteettiä.

7.4.3 Mittalähettimet ja kanavaluettelo

Kolmen K-tyypin termoparin ja yhden Pt 1000 platinavastusanturin mittalähtetiminä käytettiin Senecan K-line tuoteperheeseen kuuluvia yksikanavaisia K 109 lämpötilalähtetimiä. Yhteistä molempien anturityyppien lähtetimille on se, että ne sisältävät signaaliprosessorin, joten niissä on monien toimintojen lisäksi perussuodatus mitattavalle signaalille. Mittalähtetmien toiminta-alueet valittiin lähtetimen kyljessä olevilla 16 eri mikrokytkimellä. Mittalähtetimet tarvitsevat käyttöjännitteen, joka voi olla 19,2 V – 30 V tasajännite. Mittaussignaaliin verrannollisen ulostulevan tasajännitteen vaihtelualueeksi voidaan mittalähtetmissä valita 0 V – 5 V, 0 V – 10 V, 10 V – 0 V tai 1 V – 5 V. Vastaavasti voidaan valita ulostulevan virtasignaalin vaihtelualueeksi 0 mA – 20 mA, 4 mA – 20 mA, 20 mA – 4 mA tai 20 mA – 0 mA. Mittalähtetimet olivat galvaanisesti eristettyjä ja mittaus tapahtui 14 bitin erottelukyvylä ja tarkkuudeksi oli ilmoitettu 0.1 %. Lähtetimet asennettiin IP66 suojausluokkaan kuuluvaan suojakoteloon ja kiinnitettiin DIN-kiskoon. Suojakoteloon tehtiin läpiviennit antureille lähteille ja jännitelähteestä tuleville johtimille. Jännitelähteenä mittalähtetimmille käytettiin kahta 12 V NiMH-akkua sarjaan kytkettynä, jolloin lähtetimille saatiin sopiva 24 voltin käyttöjännite. Akusto sijoitettiin erilliseen suojakoteloon, johon asennettiin sulakesuojauksen lisäksi liittimet mittalähtetimmille lähteille käyttöjännitejohtimille ja akuston latausjohtimille. Mittalähtetimet, akusto ja liittimet on esitelty alla olevassa kuvassa 19.



Kuva 19. Vasemmalla on kuva palokammioon liitetystä mittauslaitteistosta. Oikealla on lähikuva suojakotelossa olevista mittalähtetimmistä sekä kolmesta termopariliittimestä.

Termoparien mittalähtetiminä oli Senecan K-line K 109TC. Lähtetimeen oli sisäänrakennettu kylmäpistekompensointi, jonka virhemarginaaliksi oli annettu 1,5 °C. Lähtetimen kyljessä olevien mikrokytkimien avulla valittiin toiminta-alueet seuraavasti. Termoparin tyypiksi asetettiin K ja verkkotaajuisten häiriöiden (50 Hz) kytkeytyminen esitettiin. Sisääntulosignaalin suodatus otettiin myös käyttöön. Käyttöön otettu suodatus

stabiloi mittaussignaalia pidentäen samalla mittalähettimen vasteaikaa 25 millisekunnista 55 millisekuntiin. Vasteajan 30 millisekunnin pidennyksellä ei ole tässä mittaussoveluksessa merkitystä. Lämpötila alueeksi valittiin 0 °C – 1000 °C ja mittaussignaaliin verrattavan lähettimestä ulostulevan tasajännitteen vaihtelualueeksi valittiin 0 V – 10 V. Mittalähettimien kanavat ja asetukset on esitelty alla olevassa taulukossa 1.

Taulukko 1. Kanavaluettelo

Kanava	Anturi	Mittalähetin	Lähettimen asetukset
Ch 0	● K-typin termoelementti	K-Line K109TC	0 °C – 1000 °C
Ch 1	● K-typin termoelementti	K-Line K109TC	0 °C – 1000 °C
Ch 2	● K-typin termoelementti	K-Line K109TC	0 °C – 1000 °C
Ch 3	● Pt 1000 platinavastus	K-Line K109PT1000	0 °C – 200 °C
Ch 4	● Optinen infrapuna	all-pass	mV ja kerroin 100
Ch 5	● Optinen infrapuna	all-pass	mV ja kerroin 1100
Ch 6	● Optinen infrapuna	2.8 µm kaistanpäästö	mV ja kerroin 100
Ch 7	● Optinen infrapuna	2.8 µm kaistanpäästö	mV ja kerroin 1100

Platinavastusanturin Pt 1000 mittalähettimen tyyppinä oli K-line K 109PT1000. Mittalähetin mahdollisti kaksi-, kolmi- tai nelijohdinmittauksen. Näihin mittauksiin katsottiin riittäväksi valita kaksijohdin mittaus, koska johdinvedot olivat lyhyitä. Mittaussignaalin suodatus otettiin käyttöön, vaikka se tässä mittalähettimessä pidentää vasteaikaa 50 millisekunnista 200 millisekuntiin. Suodatin estää 50 Hz häiriön kytkeytymistä mittaussignaaliin, mikä on tärkeä ominaisuus mittausten kannalta. Lämpötila-alueeksi valittiin 0 °C – 200 °C ja mittaussignaaliin verrattavan jännitteen vaihtelualueeksi valittiin 0 V – 10 V.

Termopinoanturin kanavalle Ch4 valittiin vahvistuksen kertoimeksi 100, ja kanavalle Ch5 valittiin vahvistuksen kertoimeksi 1100. Molempien kanavien infrapunasäteilyn mittaus tapahtui allpass-alueella ilman kaistan rajoitusta. Kanavalle Ch6 kertoimeksi valittiin 100 ja kanavalle Ch7 kertoimeksi 1100. Molemmille kanaville asetettiin kaistanpäästösuodatus 2,8 µm:n aallonpituusalueelle. Kaikkien mittauskanavien arvot talentuivat millivolteina vastaten kanavilla Ch0 – Ch3 lämpötilaa ja kanavilla Ch4 – Ch7 lämpötilaan verrannollista termopinoanturin detektorin absorboimaa infrapunasäteilyn intensiteettiä.

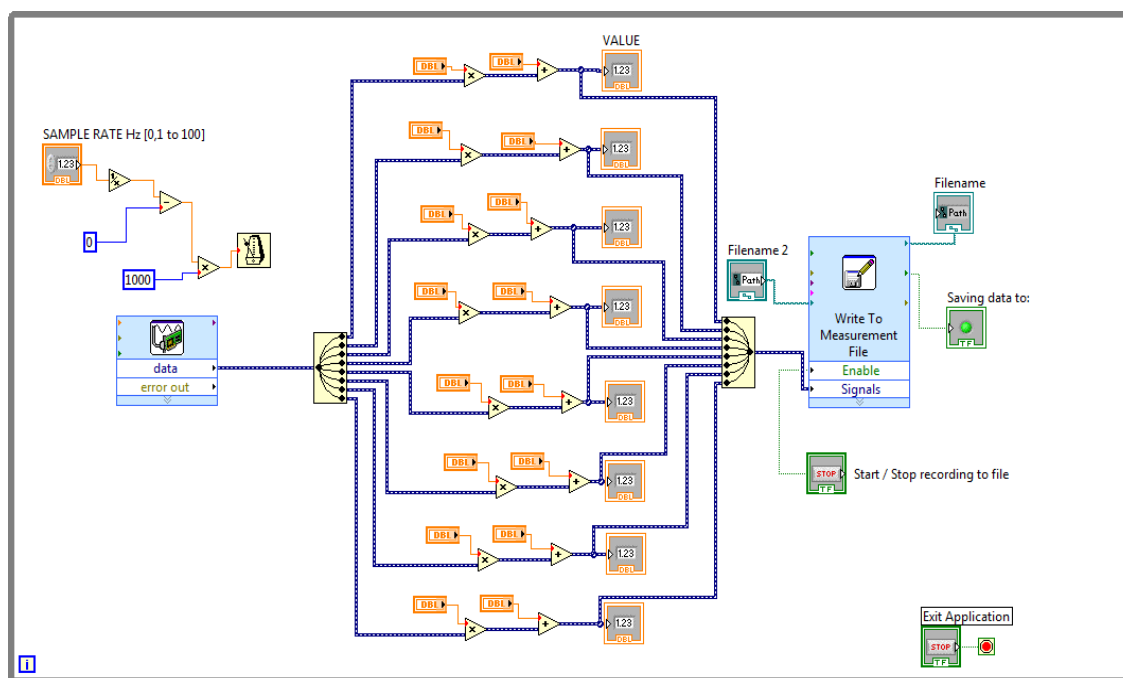
7.5 Mittausohjelmisto

Mittauksissa käytetty ohjelmisto koostui tiedonkeruukortin mukana tulleesta National Instrumentsin NI-DAQ mx:n monisäikeistä ohjelma-ajoa tukevasta ajuri- ja mittauspalveluohjelmistosta sekä Labview ohjelmointiympäristössä tehdystä virtuaali-instrumentointiohjelmistosta. Näissä mittauksissa käytetty NI-USB-6009 tiedonkeruukortti oli suoraan tuettu Labview ohjelmointiympäristössä ja korttia voitiin ohjata DAQ-mx funktioilla USB väylän kautta. Laitealustana ohjelmistoille oli kannettava PC, jossa oli Win-

dows XP käyttöjärjestelmä. Näitä mittauksia varten Labview 8.5 versiolla ohjelmoitu virtuaali-instrumentti nimettiin Dataloggeriksi, joka on esitelty tarkemmin kappaleessa 7.5.2.

7.5.1 Labview

Labview on National Instrumentin kehittämä visuaalinen ohjelmointiympäristö, jossa käytetään ohjelmointikielenä graafista G-kieltä. Labview on kehitetty lähinnä tieteellisiin ja teknisiin tarpeisiin mittaamaan ja analysoimaan erilaisista mittalaitteista tulevia signaaleja sekä näyttämään ja tallentamaan mittausten tuloksia. Ohjelmien toiminta rakennetaan kuvakkeilla ja kuvakkeita yhdistävillä johdotuksilla, kuten kuvasta 20 nähdään. Tekstimuotoista ohjelmakoodia ei tarvitse kirjoittaa lainkaan, mutta ohjelmiin on mahdollista sisällyttää esimerkiksi Matlab- tai C-kielistä lähdekoodia. Nämä ominaisuudet mahdollistavat nopean tavan hoitaa laitteiden ohjauksia ja tiedonkeruuta.



Kuva 20. Datalogger virtuaali-instrumentin lohkokaavio eli datavuokaavio.

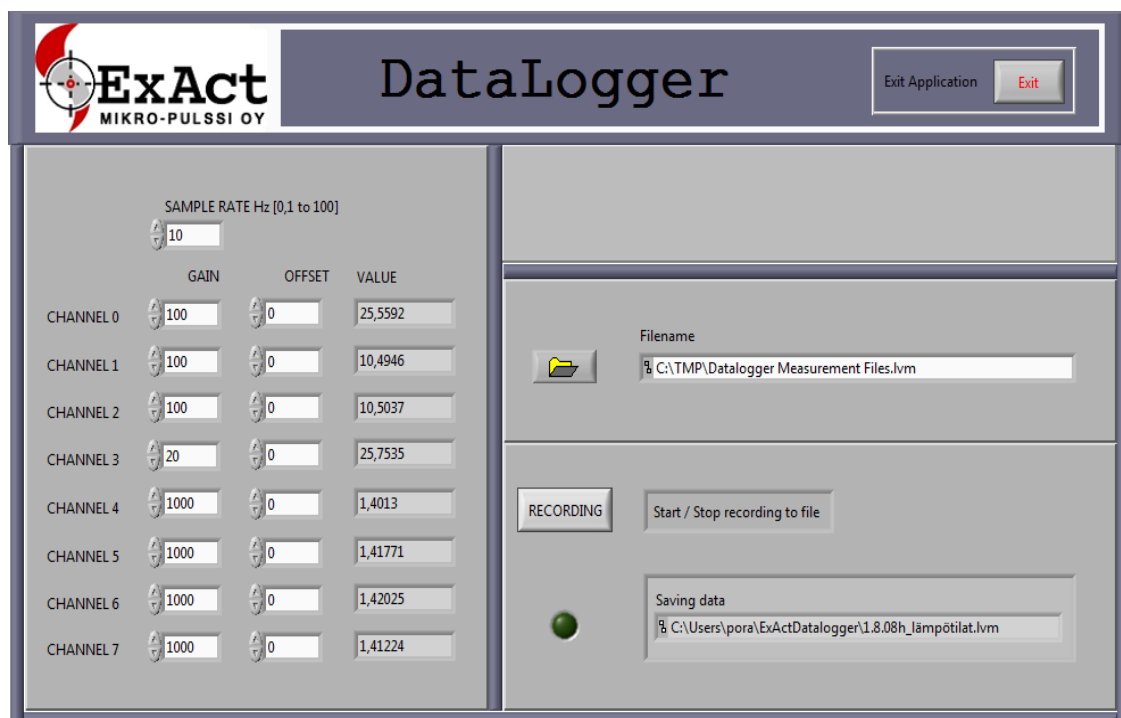
Jokainen Labview:in pää- ja aliohjelma on virtuaali-instrumentti ja niistä käytetään lyhennettä VI. Ohjelman käyttöliittymä rakennetaan etupaneeliin. Etupaneeli voi sisältää erilaisia graafisia elementtejä kuten painonappeja, säätimiä, näyttöjä, merkkivaloja tai vaikka Windowsin ohjelmistokomponentteja. Tuloina toimivia elementtejä, joiden arvoja voidaan muuttaa, kutsutaan Labview ohjelmoinnissa kontrolleiksi. Lähtöinä toimivia elementtejä, joilla esitetään tietoja, kutsutaan indikaattoreiksi. Virtuaali-instrumentilla on etupaneelin lisäksi ohjelmitava lohkokaavio, joka määrää VI:n toiminnan. Tähän työhön suunnitellusta Datalogger VI:stä on esitelty lohkokaavio kuvassa 20 ja etupaneeli kuvassa 21. Etupaneelin indikaattoreita ja kontrolleja vastaavat lohkokaaviossa terminaalit. Lohkokaaviossa voidaan lisätä aliohjelmia ja laskentaoperaatioita, sekä yhdistää

terminaaleja toisiinsa. Lohkokaavio sisältää sovelluksen lähdekoodin ja on myös samalla kuvaus ohjelman datavuokaaviosta, jossa johdotus määrää datavuon kulun.

Valmista Labview ohjelmaa voi ajaa ilman kääntämistä ohjelmointiympäristössään. Ohjelmasta voi myös kääntää siirrettävän exe-tiedoston, joka sisältää koko ohjelman, lukuun ottamatta kirjastotiedostoja. Tämä seikka mahdollistaa virtuaali-instrumenttien siirtämisen ja suorittamisen toisessa koneessa missä VI on varsinaisesti kehitetty. Exe-tiedosto vaatii toimiakseen tietokoneen käyttöjärjestelmään asennetun vapaasti jaettavan ajonaikaisen suoritusympäristön eli ”Labview-run-time-engine” ohjelman. Vanhojen virtuaali-instrumenttien muokkaamiseen ja uusien luomiseen tarvitaan kuitenkin Labview ohjelmointiympäristöä.

7.5.2 Datalogger

Mittauksia varten haluttiin tehdä tiedonkeruulaitteistolle mahdollisimman yksinkertainen ja selkeä käyttöliittymä eli etupaneeli. Tämä toteutettiin edellä kuvatulla Labview 8.5 ohjelmistolla ja virtuaali-instrumentti nimettiin Dataloggeriksi. Mittauksissa käytetty Dataloggerin etupaneeliin sijoitetut indikaattorit ja kontrollit näkyvät alla olevassa kuvassa 21.



Kuva 21. Datalogger virtuaali-instrumentin etupaneeli.

Dataloggerin ensimmäiset versiot sisälsivät liian paljon etupaneeliin sijoitettuja indikaattoreita ja kontrolleja. Liika informaatio haluttiin poistaa lopullisesta versiosta, koska Dataloggerin oli tarkoitus palvella myös yrityksen muita mittaussovelluksia. Tämän vuoksi etupaneeliin ei ole asetettu esimerkiksi kiinteiksi yksiköiksi kuin näytteenoton taajuus. Myös graafisten kuvaajien näytöt poistettiin, koska kahdeksan kanavan mitta-

usarvojen seuraaminen niistä olisi ollut mittaushetkellä varsin hankalaa. Ainoastaan kanavien lukuarvoja esittävät numerokentät olivat riittävän selkeitä seurata testausten aikana. Selkeyden vuoksi etupaneeli jaettiin pystysuunnassa kahteen puoliskoon. Vasemmalle puolelle sijoitettiin tiedonkeruun indikaattorit ja kontrollit, ja etupaneelin oikealle puolelle sijoitettiin Windowsin ohjelmistokomponentit mittaustiedon tallennusta varten. Dataloggerin etupaneelin vasemmassa yläkulmassa olevaan mittauskanavien näytteistystaajuus numerokenttään voidaan syöttää arvoja näppäimistöltä tai kentän vasemmalla puolella olevista nuolipainikkeista. Näytteistystaajuus on tässä sovelluksessa rajoitettu 0,1 Hz – 100 Hz, ja se on yhteinen kaikille kanaville. Tämän kentän alapuolella näkyy jokaisen kahdeksan mittauskanavan omat indikaattorit ja kontrollit. Kontrollien avulla voidaan muuttaa kanavan vahvistusta (engl. Gain) ja korjausta (engl. Offset). Tämä tapahtuu numeronäppäimistön syötteillä tai painamalla numerokentän laidassa olevia ylös/alas nuolipainikkeita hiiren osoittimella. Indikaattorina toimivaan numerokenttään (engl. Value) tulostuu kanavan mittaustiedon lukuarvona näytteistystahdissa. Neljälle ensimmäiselle kanavalle (Ch0 – Ch3) vahvistuskerroin valittiin siten, että numerokenttään tulostuva lukuarvo on suoraan lämpötila-arvo celsiusasteina. Kolmelle ensimmäiselle kanavalle (Ch0 – Ch2) asennettiin termoparien mittalähtimet, joiden lämpötila-alueeksi aseteltiin 0 °C – 1000 °C ja ulostulevaksi jännitealueeksi 0 V – 10 V. Kun näille kanaville valittiin vahvistuskertoimen arvoksi 100, saatiin termoparien mittaustiedot vastaamaan celsiusasteita. Vastaavasti kanavalla Ch3 olevalle Pt 1000 anturin mittalähtimelle aseteltiin lämpötila-alueeksi 0 °C – 200 °C ja siihen verrattavissa olevaksi ulostulojännitealueeksi 0 V – 10 V. Antamalla tälle kanavalle vahvistuskertoimen arvoksi 20, vastaavat mittaustiedot suoraan celsiusasteita.

Dataloggerin etupaneelin oikealla puolella olevat kontrollit ja indikaattorit ovat mittaustiedotiedostojen tallentamista varten. Kansiopainiketta painamalla voi tarkastella tietokoneen tiedostoja ja kansioita, joihin mittaustiedon halutaan tallentaa. Painikkeen oikealla puolella olevaan tekstikenttään ”Filename” voi myös syöttää suoraan uuden tiedostopolun. Kansiopainikkeen alapuolella näkyvä painonappi ”Recording/Stop” aloittaa tai lopettaa mittaustiedon tallentamisen painettaessa. Kun tallennus aloitetaan painamalla ”Recording” painiketta, muuttuu painike ”Stop” painikkeeksi ja päinvastoin. Vihreä ”LED” merkkivalo syttyy kun mittaustiedon luetaan tietokoneen muistiin. Merkkivalon vieressä oleva tekstikenttä ”Saving data” näyttää koko tiedostopolun johon viimeisin mittaustiedotiedosto tallennettiin. Mittaustiedon luettiin kahdeksalta mittauskanavalta ja sen haluttiin tallentuvan muodoltaan kahdeksansarakkeiseksi numeeriseksi raakadata-tiedostoksi tietokoneen muistiin. Mittaustiedotiedostot ovat siten helposti luettavissa lähes kaikilla yleisillä ohjelmistoilla, kuten esimerkiksi Excelillä ja Matlabilla. Käyttöliittymästä päästään poistumaan painamalla etupaneelin oikeassa yläreunassa olevaa ”Exit” painiketta.

Dataloggerin etupaneelin suunnittelussa pidettiin tärkeänä selkeyttä ja käyttämisen yksinkertaisuutta, koska tiedettiin, että sitä tullee käyttämään yrityksen muissa palotestaukseen liittyvissä mittauksissa. Kontrollien ja indikaattoreiden sijainnit ja kuvakkeet valittiin siten, ettei erehdyksen vaara olisi, ja että ne sisältäisivät riittävästi tietoa omasta

toiminnastaan. Nämä asiat olivat mittauskäyttöliittymän suunnittelussa tärkeitä myös siksi, että yhdenkin mittauskerran epäonnistuminen saattaisi koitua kalliiksi ja testaustulosten kannalta kohtalokkaaksi.

8 MITTAUSTULOKSET

Mittaukset koostuivat kolmesta mittaussarjasta, joiden tulokset on esitetty antureiden antamina jännitteinä ajan funktiona kuvissa 22 – 29 ja liitteen 1 kuvissa 30 – 32. Tärkeimmät tiedot mittaussarjoista on koottu alla olevaan taulukkoon 2. Taulukosta nähdään testattavat suojavaippamateriaalit ja niiden sisä- ja ulkohalkaisijat sekä käytetyt polttoaineet määrineen.

Taulukko 2. Tiedot kolmen mittaussarjan 15:sta mittauskerrasta.

Materiaali	sisä-/ulkohalkaisija (mm)	Palava aine, määrä (ml)
Ensimmäinen mittaussarja		
1. Silikonikumi	7/12	N-heptaanin ja 5%:sen tolueenin seos, 50 ml
2. FEP	6/8	N-heptaanin ja 5%:sen tolueenin seos, 50 ml
3. FEP*	6/8	N-heptaanin ja 5%:sen tolueenin seos, 50 ml
4. PFA	6/8	N-heptaanin ja 5%:sen tolueenin seos, 50 ml
5. PTFE	6/7	N-heptaanin ja 5%:sen tolueenin seos, 50 ml
6. PFA	10/12	N-heptaanin ja 5%:sen tolueenin seos, 50 ml
7. PTFE	12/14	N-heptaanin ja 5%:sen tolueenin seos, 50 ml
Toinen mittaussarja		
1. FEP	6/8	N-heptaanin ja 5%:sen tolueenin seos, 50 ml
2. PFA	10/12	N-heptaanin ja 5%:sen tolueenin seos, 50 ml
3. PTFE	12/14	N-heptaanin ja 5%:sen tolueenin seos, 50 ml
4. PTFE	12/14	N-heptaanin ja 5%:sen tolueenin seos, 150 ml
Kolmas mittaussarja		
1. PTFE	12/14	Liikkuva n-heptaanin ja 5%:sen tolueenin seos, 50 ml
2. PTFE	12/14	Liikkuva kytevä hiillos, 2000 ml
3. PTFE	12/14	Pysähtyvä kytevä hiillos, 2000 ml
4. PTFE	12/14	Auringon suora säteily

* Piirilevy on platinavastusanturin ja liekin välissä testattavan suojavaipan sisällä.

Ensimmäisessä mittaussarjassa mitattiin ilmaisinprototyyppien suojavaippamateriaalien termistä lämmönsiirtokykyä kanavan Ch3 platinavastusanturilla. Toisessa mittaussarjassa mitattiin suojavaippamateriaalien säteilylämmönsiirtokykyä termopinoanturin kanavilla Ch4, Ch5, Ch6 ja Ch7. Kolmannessa mittaussarjassa testattiin ilmaisinprototyyppi, mikä sisälsi platinavastusanturin ja termopinoanturin yhdistelmämittauksen. Kaikissa mittaussarjoissa kanavien Ch0, Ch1 ja Ch2 termoparit mittasivat ainoastaan esilämmitetyn lohkon (Ch0) ja palokammion (Ch1 ja Ch2) lämpötilaa. Ensimmäisessä ja toisessa

mittaussarjassa palokokeet tehtiin liekehtivällä ja paikallaan pysyvällä lämpölähteellä. Kolmannessa mittaussarjassa palokokeissa käytettiin liikkuvaa lämpölähdettä, joka oli joko kytevä tai liekehtivä.

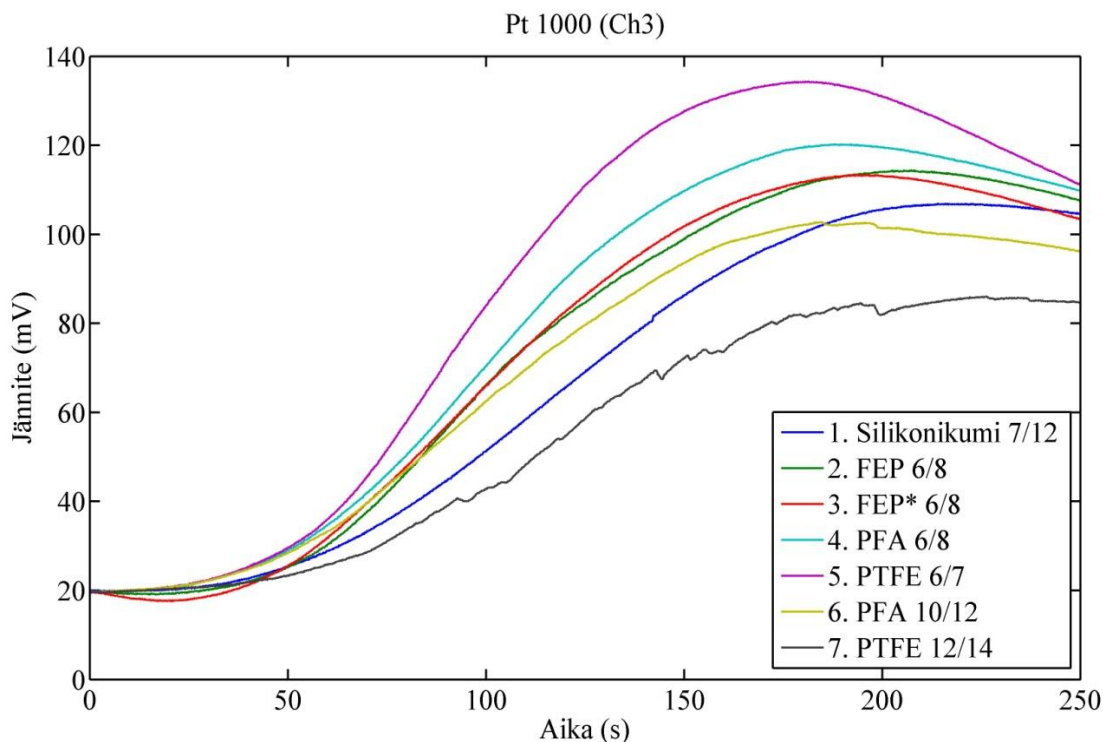
Näytteenottotaajuus oli ensimmäisessä ja toisessa mittaussarjassa 10 Hz ja kolmannessa mittaussarjassa 30 Hz. Kaikissa kolmessa mittaussarjassa termistä lämpöä mittaavien kanavien Ch0, Ch1, Ch2 ja Ch3 jännitearvot millivolteina vastaavat suoraan lämpötilaa celsiusasteina, ja termoparien jännitesignaalit kanavilla Ch1 ja Ch2 esittävät todellisimman lämpötilan kehityksen palokammiossa palokokeen aikana. Mittaussarjoissa infrapunasäteilyä mittaavat kanavat Ch4, Ch5, Ch6 ja Ch7 eivät mitanneet absoluuttista lämpötilaa vaan infrapunasäteilyn intensiteettiä verrannollista jännitettä joko koko kaistalla tai 2.8 μm kaistanpäästöalueella. Lisäksi näillä kanavilla (Ch4 – Ch7) käytettiin myös erilaisia vahvistuksen kertoimia erottamaan jännitesignaalit toisistaan. Palokokeiden mittaustulokset tallennettiin antureiden antamina millivoltin jännitteinä ja valitulla näytteistystaajuudella PC:n muistiin. Mittaustuloksista piirrettiin lopuksi Matlabilla jännitteet ajan funktiona, jotka esittävät kolmen mittaussarjan 15:sta eri mittauskerrasta tallennetun datan graafisesti.

8.1 Ensimmäinen mittaussarja

Ensimmäisessä mittaussarjassa oli seitsemän mittauskertaa ja kuusi erilaista testattavaa suojavaippamateriaalia. Testaukset tehtiin termiselle lämmön siirtymiselle ilmaisinytityypin suojavaipan läpi. Yksi ylimääräinen mittaus oli sen vuoksi, koska haluttiin selvittää kuinka suuri merkitys mittausarvoihin on, kun piirilevyn pintaan tinattu platinavastusanturi käännetään liekistä pois päin testattavan suojavaippaputken sisällä. Ensimmäisen mittaussarjan mittaukset aloitettiin työntämällä piirilevy ja siitä lähtevät platinavastusanturin johdot vuorotellen kunkin testattavan suojavaippaputken sisään. Prototyyppi asetettiin tämän jälkeen palokammion yläosaan sitä varten rakennetulle telineelle. Testaus aloitettiin käynnistämällä videokuvaukset ja tiedonkeruuhjelmisto. Tämän jälkeen palokammion pohjalla olevaan polttomaljaan kaadettiin 50 ml N-heptaanin ja 5 % :sen tolueenin seosta, joka sytytettiin palamaan, ja palokammion luukut suljettiin. Nämä toimenpiteet toistettiin jokaisella ensimmäisen mittaussarjan seitsemällä mittauskerralla. Termopinoanturin kanavat Ch4 – Ch7 mittasivat testausten aikana lämpösäteilyä ilman suojavaippamateriaalien optisia vaikutuksia ja näyttivät siten lähes viiveettä liekin syttymis- ja sammumisajankohdat. Termoparin kanavat Ch4 – Ch5 ja termoparien kanavat Ch1 ja Ch2 antavat siten vertailukohdan ensimmäisen mittaussarjan mittauksille.

Ensimmäisen mittaussarjan tärkeimmät mittaustulokset kaikkien testattavien suojavaippamateriaalien osalta on koottu kuvaan 22. Kuva esittää kanavalta Ch3 mitattujen platinavastusanturin Pt 1000 jännitteet ajan funktiona mittaussarjan seitsemästä mittauskerrasta. Tämän kanavan mittaustulokset antavat tietoa materiaalien termisistä lämmönsiirto-ominaisuuksista jännitteen (lämpötilan) nousunopeuden ja saavutetun maksimi-arvon perusteella. Hyvin suojavaipaksi soveltuva materiaali reagoi nopeasti lämpö-

tilan nousuun, sekä saavuttaa suuren maksimiarvon. Ensimmäinen mittausta tehtiin silikonisuoja-aipealle, jonka mittaustulos on esitetty alla olevassa kuvassa 22 sinisellä värillä. Mittaustuloksen perusteella silikonikumi reagoi kohtalaisen hitaasti, ja sen saavuttama jännitteen maksimiarvo on pienempi kuin viidellä muulla testatulla suojavaipalla. Lisäksi silikonisuoja-aipean rakenteeseen tuli palokokeen seurauksena lämmöstä aiheutuneita muotovaurioita, ja se nokeentui mustaksi vaurioituneista kohdistaan.

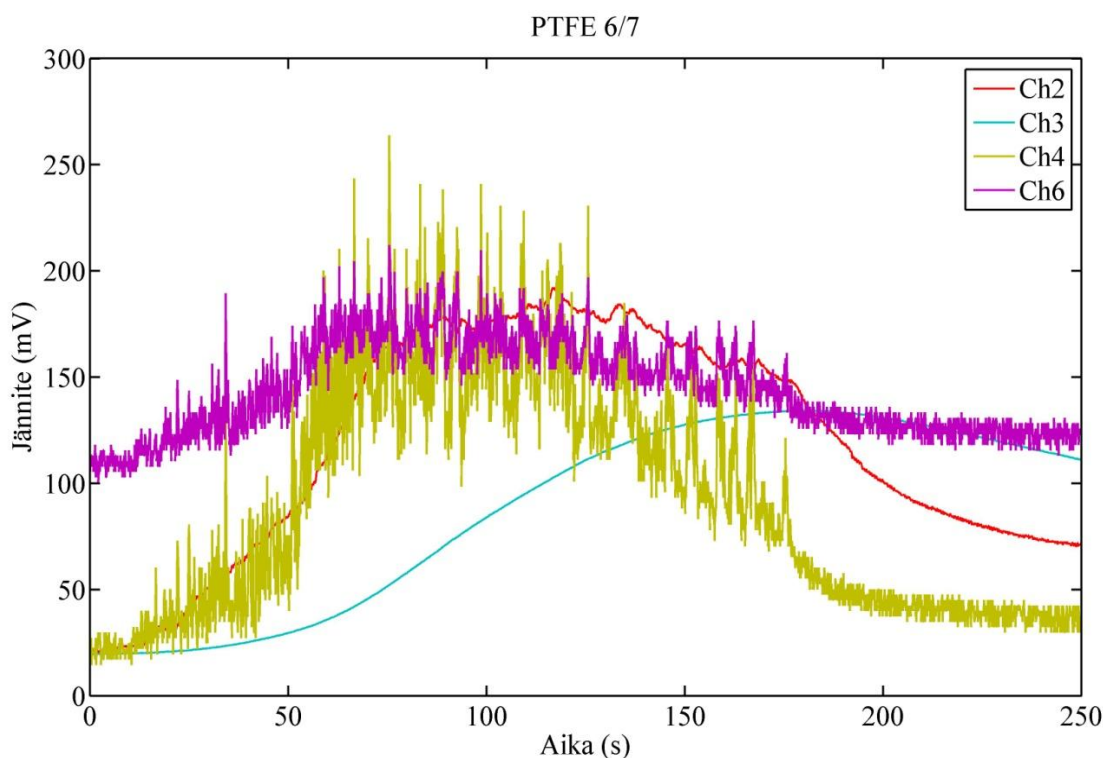


Kuva 22. Palokokeessa platinavastusanturilla mitattujen jännitteiden arvot ajan funktiona eri suojavaippamateriaaleille. Y-akselin jännitteet millivoltteina vastaavat suoraan celsiusasteita.

Toisena testattavana suojavaippamateriaalina oli FEP, jonka mittaustulos on esitetty kuvassa 22 vihreällä värillä. FEP suojavaipan mittaustuloksista nähdään, että platinavastusanturi reagoi nyt nopeammin palokammion kohoavaan lämpötilaan, ja jännitesignaali saavuttaa suuremman maksimiarvon kuin silikonikumi. Palokokeen jälkeen FEP suojavaippa oli lisäksi pinnaltaan noeton, eikä sen rakenteessa havaittu lämmöstä aiheutuneita muutoksia. Kolmas testattava suojavaippamateriaali oli sama kuin edellä oleva FEP, mutta erona edelliseen mittaukseen oli suojavaipan sisällä olevan piirilevyn asento. Piirilevy käännettiin tässä mittauksessa liekistä pois päin palokokeen ajaksi, ja mittaustulos on esitetty kuvassa 22 punaisella värillä (FEP*). Tämän mittaustuloksen perusteella piirilevyn kääntämisellä ei ole juurikaan merkitystä, koska piirilevyllä oleva platinavastusanturi ei reagoi lämpösäteilyyn vaan ympäristön termiseen lämpöön, joka siirtyy piirilevyille suojavaipan läpi pääasiassa johtumalla ja konvektiolla.

Kuvassa 22 on esitetty vastaavasti muiden eri vahvuisten ja eri halkaisijoilla olevien PFA ja PTFE suojavaippojen mittaustulokset. Ensimmäisen mittaussarjan perusteella parhaiten termiseen lämmönsiirtymiseen soveltuva suojavaippa on PTFE 6/7, jonka

mittaustulos on esitetty kuvassa 22 violetilla värillä. Hyvään mittaustulokseen vaikuttaa suojavaipan massa ja sen sisällä olevan ilmatilan tilavuus. Mitä pienempi on lämmitettävä suojavaipan massa, ja mitä ohuempi on sen sisällä olevan eristävän ilmakerroksen paksuus, sitä nopeammin anturi pystyy reagoimaan ympärillä olevaan termiseen lämpötilan muutokseen. Tästä syystä myös seinämävahvuudeltaan ohuemmat ja halkaisijoiltaan pienemmät PFA ja FEP suojavaippavaihtoehdot soveltuvat mittaustulosten perusteella paremmin linjailmaisimen termiseen rakenteeseen kuin seinämävahvuudeltaan paksummat ja halkaisijoiltaan suuremmat suojavaipat. PTFE 6/7 suojavaipasta platinavastusanturilla mitattua kanavan Ch3 jännitesignaalia on verrattu kuvassa 23 kanavan Ch2 termoparin ja kanavien Ch4 ja Ch6 termopino-osioiden antamiin jännitesignaaleihin. Kanavan Ch2 jännitesignaali kuvaa palokammion termistä lämpötilan kehitystä, ja kanavien Ch4 ja Ch6 jännitesignaalit kuvaavat säteilevän lämmön intensiteetin kehittymistä suojavaipan ulkopuolella olevassa palokammion ilmatilassa.

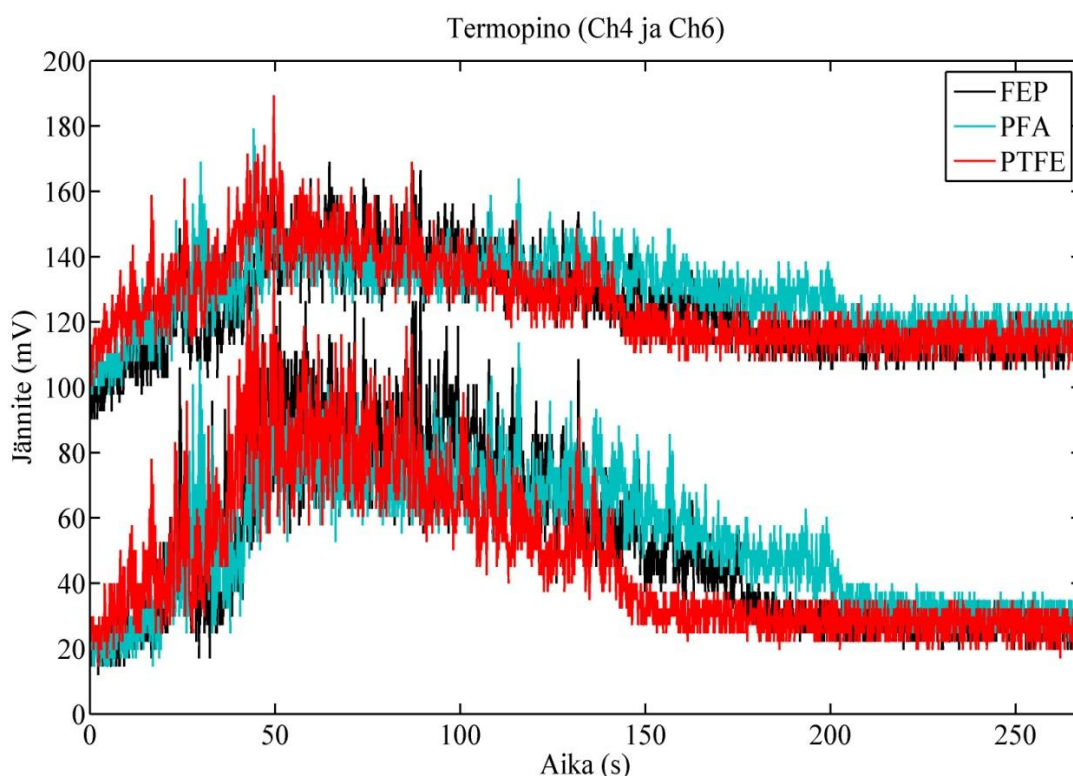


Kuva 23. PTFE 6/7 suojavaipan sisäpuolelta mitattu terminen lämpeneminen (Ch3), palokammion ilmatilan terminen lämpeneminen (Ch2) ja infrapunasäteilyn intensiteetin kasvaminen ilmatilassa palokokeen aikana (Ch4 ja Ch6). Kanavien Ch4 ja Ch6 jännitesignaalien arvot ovat lämpötilaan verrannollisia suhteellisarvoja ja kanavien Ch2 ja Ch3 arvot vastaavat suoraan lämpötiloja celsiusasteina.

Kuvasta 23 nähdään, että suojavaipan sisäpuolen terminen lämpeneminen on hidasta, ja siitä aiheutuu arviolta noin minuutin viive verrattuna ympärillä olevan palokammion lämpötilan kehitykseen. Näiden ensimmäisen mittaussarjan mittaustulosten perusteella testausten jatkovaiheista karsittiin pois silikonikumi 7/12 sekä PFA 10/12 ja PTFE 12/14, joten toiseen mittaussarjaan selvisivät ainoastaan sisähalkaisijoiltaan 6 mm olevat FEP, PFA ja PTFE.

8.2 Toinen mittaussarja

Toisessa mittaussarjassa oli neljä mittauskertaa, ja siinä tehtiin jatkotestaus kolmelle ensimmäisen mittaussarjan parhaalle ilmaisinprototyypin suojavaippamateriaalille. Testaukset tehtiin mittaamalla suojavaippamateriaalien lävistämä infrapunasäteily. Mittaukset aloitettiin asentamalla nelikanavainen termopinoanturi vuorotellen testattavien suojavaippaputkien sisälle. Suojavaippaputkien seinämävahvuudet olivat jokaisen testattavan materiaalin osalta yhden millimetrin vahvuisia. Tämän mittaussarjan poltettavana aineena oli myös edellisen mittaussarjan tapaan 50 millilitraa N-heptaanin ja viisiprosenttisen tolueenin seosta, mutta mittaussarjan viimeisessä eli neljännessä mittauksessa, poltettavan aineen määrä oli kolminkertainen. Erona ensimmäiseen mittaussarjaan oli myös se, että kanavan Ch3 platinavastusanturi ei ollut mukana näissä mittauksissa. Yhdistetyt mittau tulokset FEP, PFA ja PTFE suojavaippamateriaalien osalta on esitetty alla olevassa kuvassa 24. Kuvasta nähdään suojavaippoja läpäisseen infrapunasäteilyn määrään verrannolliset jännitteet ajan funktiona kolmesta ensimmäisestä mittauskerrasta.

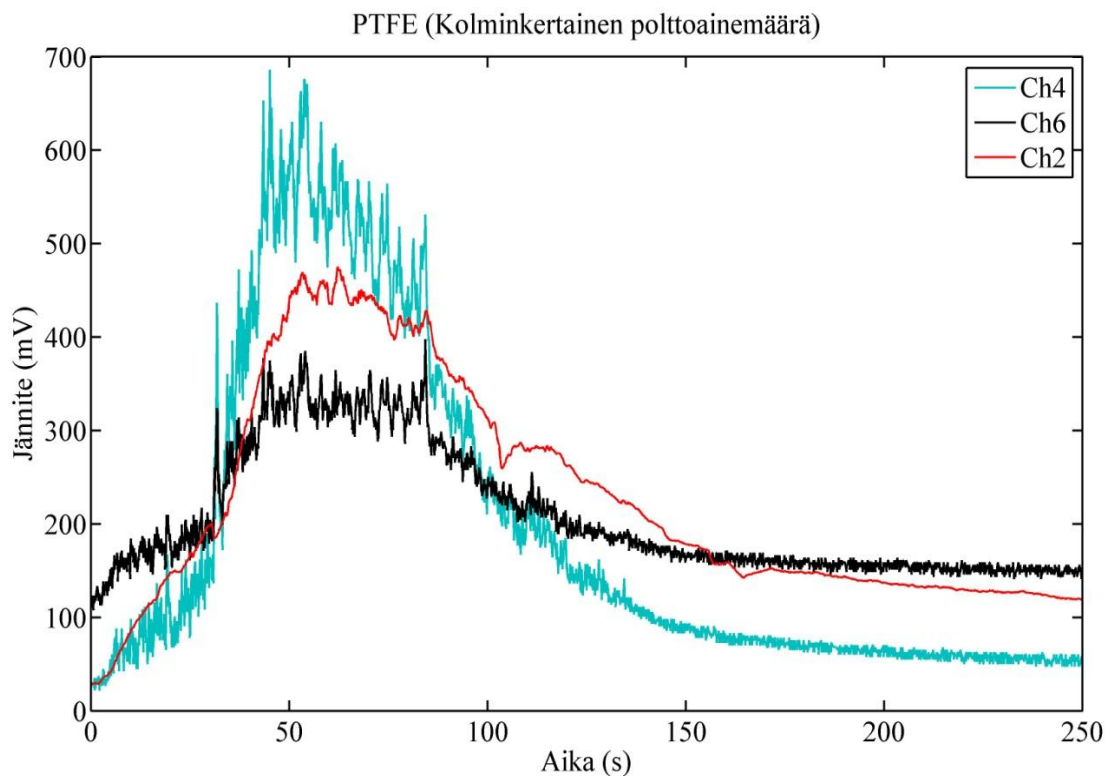


Kuva 24. FEP, PFA ja PTFE suojavaippojen läpi mitatut infrapunasäteilyn intensiteettiin verrannolliset jännitteet liekehtivän palon testauksessa. Mittau tulokset on esitetty termopinoanturin kanavien Ch4 (alempi mittaus signaalisarja) ja Ch6 (ylempi mittaus signaalisarja) osalta.

Kuvassa 24 termopinoanturin kanavalla Ch4 mitattua ja vastaanotettua infrapunasäteilyn aallonpituus aluetta ei ole rajoitettu, mutta kanavalla Ch6 on $2,8 \mu\text{m}$:n kaistanpäästösuodatin, ja lisäksi kanavan offset-jännitteeksi on asetettu 80 mV signaalisarjojen

erottamiseksi toisistaan. Myös tämän mittaussarjan perusteella PTFE suojavaippamateriaali erottuu parhaaksi, mutta suuria eroja ei ole infrapunasäteilyn läpäisyominaisuuksissa verrattuna FEP ja PFA materiaaleihin. Alkupalon vaiheeseen (0 s – 50 s) ja palon hiipumisvaiheeseen (100 s – 200 s) PTFE materiaali reagoi nopeimmin. Täyden palamisen vaiheessa (50 s – 100 s) näillä kolmella testattavalla materiaalilla ei ole juurikaan eroa.

Toisen mittaussarjan neljäs mittauskerta tehtiin edellisten mittausten perusteella parhaaksi materiaaliksi osoittautuneelle PTFE suojavaipalle kolminkertaisella polttoainemäärällä. Mittaustulos kanavien Ch2, Ch4 ja Ch6 osalta on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Kolminkertaisella polttoainemäärällä testattu PTFE suojavaippa. Läpäisseen infrapunasäteilyn määrään verrannollinen jännite on mitattu termopinoanturin kanavalla Ch4 ilman suodatusta ja kanavalla Ch6 2,8 μm :n kaistanpäästösuoatuksella. Kanavan Ch2 termoparin mittaussignaali esittää termisen lämpötilan kehityksen palokammiossa. Sille Y-akselin mV jännitearvot vastaavat celsiusasteita.

Kun verrataan kuvan 24 PTFE suojavaipan mittaustuloksia kuvan 25 mittaustuloksiin, nähdään, että kolminkertainen poltettavan aineen määrä nostaa termopinoanturin kanavalla Ch6 mitaamaa jännite-eroa alkupalon ja täyden palamisen vaiheen välillä nelinkertaisesti ja kanavalla Ch4 mitattua jännitettä lähes kymmenkertaiseksi. Kanavan Ch2 mittaustulos näyttää todellisimman palokammion termisen lämpötilan kehityksen asetumalla kanavien Ch4 ja Ch6 mittaustulosten väliin, kuten kuvasta 25 nähdään.

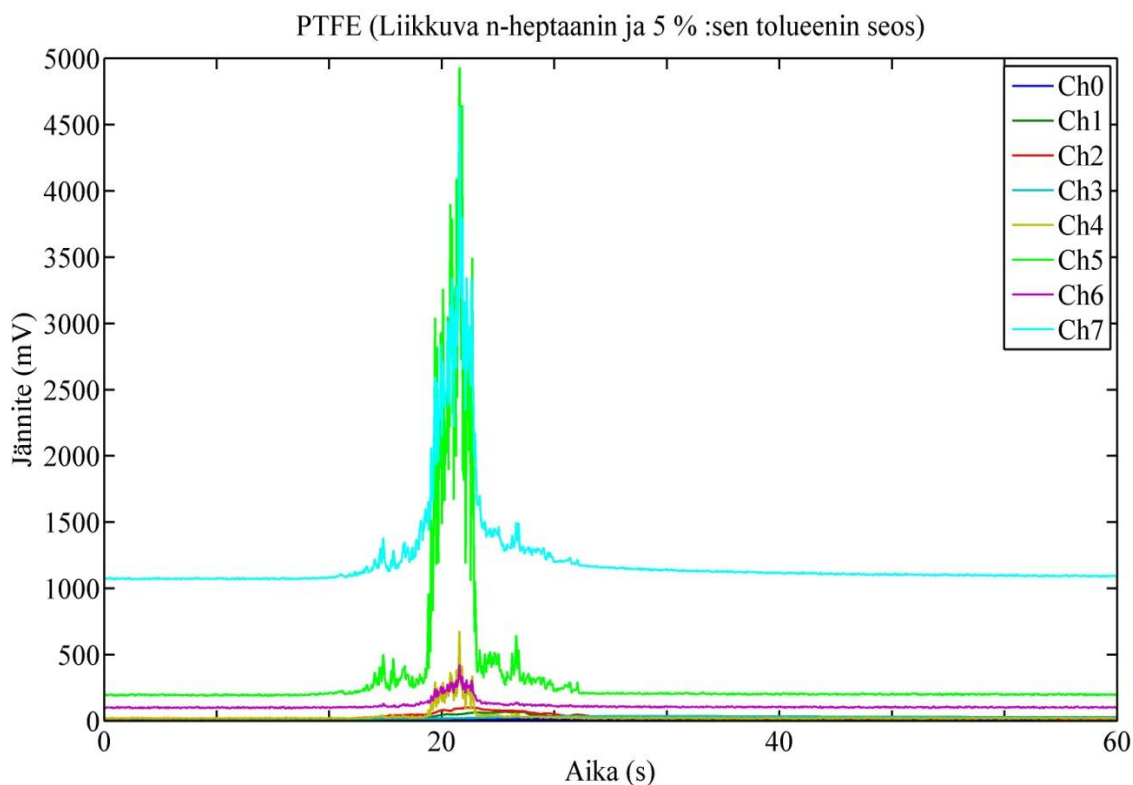
8.3 Kolmas mittaussarja

Kolmas mittaussarja sisälsi platinavastusanturin ja termopinoanturin yhdistelmämittauksen linjailmaisinprototyypille. Koska ensimmäisessä ja toisessa mittaussarjassa mittaukset tehtiin liekehtiville ja paikallaan pysyville lämpölähteille, tehtiin mittaukset nyt liikkuville ja kyteville lämpölähteille. Kolmannessa mittaussarjassa oli neljä mittauskertaa, joista kolme ensimmäistä oli edellisten mittaussarjojen tapaan palokokeita, mutta neljäs mittauskerta tehtiin auringon suoralle säteilylle. Palokammio laajennettiin nyt kolmen kuutiometrin tilavuiseksi, ja sen pohjalle asennettiin palavalle aineelle kuljetinrata. Kokoamisen jälkeen tehtiin neljä koepolttoa, jotta saatiin nokeentumisen avulla samanlainen emissiivisyys uusille palokammion laajennuselementtien sisäseinäpinnoille. Kuljetinrata oli kuusi metriä pitkä, joten se ulottui 1,5 m pituudelta molempien palokammion päätyseinien yli. Laajennettu palokammio ja kuljetinrata esiteltiin kuvassa 13. Lämmönlähteinä käytettyjen palavien aineiden kuljetusnopeus oli mittauksissa 0,1 m/s. Testattavana prototyypin suojavaippamateriaalina oli enää PTFE, joka valikoitui toisen mittaussarjan mittaustulosten perusteella.

Edellä kuvatuilla mittausjärjestelyillä tehtiin seinämävahvuudeltaan yhden millimetrin paksuiselle PTFE suojavaipalle kolme mittauskertaa. Mittaustulokset niistä on esitetty kuvissa 26, 27 ja 28. Kuvissa heikosti näkyvien termistä lämpöä mittaavien kanavien Ch0 – Ch3 mittaustuloksilla ei ole niin suurta merkitystä tässä mittaussarjassa, koska lämpölähte oli liikkuva ja lämpölähteenä käytettiin myös kytevää hiillosta, jonka emittoima infrapunasäteilyn määrä olisi ollut liian pientä termisesti havaittavaksi. Tällaisten palojen havaitsemiseen soveltuvat ainoastaan infrapunasäteilyn määrään reagoivat anturit, joten tärkeimmät mittaustulokset saatiin mittauskortin kanaville Ch4 – Ch7 kytke tyiltä termopinoanturiosioilta. Termistä lämpöä mittaavien kanavien Ch0 – Ch3 mittaustulokset näiden kolmen ensimmäisen mittauskerran osalta erottuvat selkeämmin liitteen 1 kuvissa 30, 31 ja 32, joissa Y-akselilla oleva jänniteasteikko on muutettu logaritmisiksi.

Kolmannen mittaussarjan ensimmäinen mittaus tehtiin liikkuvalla ja liekehtien palavalle n-heptaanin ja viisiprosenttisen tolueenin seokselle. Polttoaineen määrä oli 50 millilitraa, ja polttomalja oli sama kuin edellisissä mittaussarjoissa, mutta nyt se liikkui ilmaisिनprototyypin ohitse. Maljassa oleva polttoaine sytytettiin ja odotettiin noin 30 sekuntia, kunnes malja päästettiin liikkumaan radan toiseen päähän 0,1 m/s nopeudella. Maljan saavutettua radan päätepisteen, se pysähtyi paikalleen odottamaan palon hiipumista. Mittaustulokset tästä palokokeesta kaikkien mittauskortin kanavien osalta on esitetty kuvassa 26 ja liitteen 1 kuvassa 30. Kuvan 26 mittaustuloksista nähdään, että termopinoanturi reagoi voimakkaammin liikkuvaan lämpölähteeseen kuin paikallaan olevaan. Ero havaitaan, jos verrataan samojen mittauskanavien (C4 ja Ch6) osalta kuvan 26 mittaustuloksia kuvan 24 mittaustuloksiin. Molemmat mittaustulokset saatiin palokokeista, joissa poltettava aine ja sen määrä olivat samoja. Ainoa ero palokokeiden välillä oli siinä, että kuvan 24 mittaustulokset saatiin paikallaan olevasta lämpölähteestä ja kuvan 26 mittaustulokset liikkuvasta, prototyypin ohittavasta lämpölähteestä. Kuvan 26

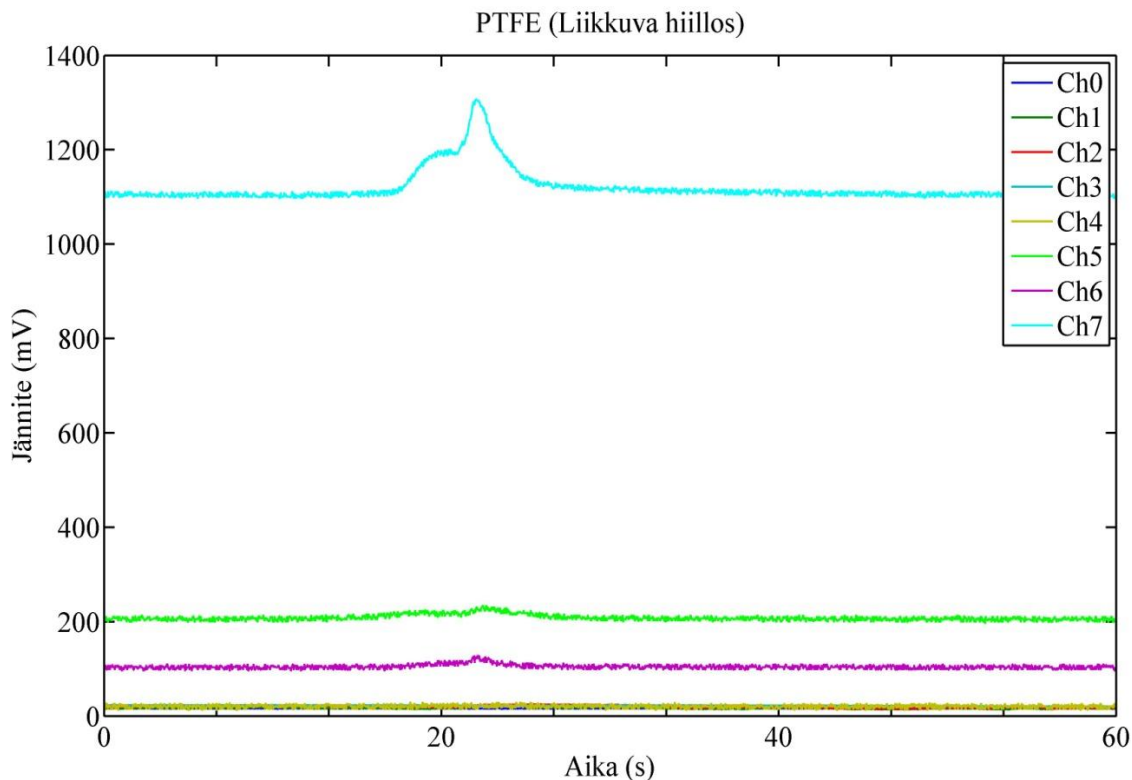
mittaustulokset vastaavat ennemminkin kuvan 25 mittaustuloksia, jossa lämpölähde oli paikallaan, ja poltettavan aineen määrä oli kolminkertainen verrattuna normaaliin palokokeeseen. Kuvien 25 ja 26 mittaustuloksista nähdään, että kanavien Ch6 (300 mV) ja Ch4 (600 mV) jännitteiden maksimi-arvot vastaavat lähes toisiaan. Tämä johtuu siitä, että termopinoanturi reagoi saapuvan infrapunasäteilyn intensiteetin muutoksiin voimakkaasti, ei sen absoluuttisen määrään.



Kuva 26. Linjailmaisiprotootyypin jännitteet ajan funktiona liikkuvan (0,1 m/s) ja liekehtivän palon testauksessa. Kanavien Ch4 – Ch7 jännitesignaalit ovat verrannollisia ilmaisimen vastaanottamaan infrapunasäteilyn määrään. Kanavilla Ch4 ja Ch5 on erilaiset vahvistuskertoimet ja kanavilla Ch6 ja Ch7 on 2,8 μm :n kaistanpäästösuodatus sekä erilaiset vahvistuskertoimet.

Tämän mittaussarjan toinen mittaus tehtiin samalla tavalla kuin edellä oleva ensimmäinen mittaus, mutta kuljetinradalla liikkui nyt kytevä hiillos. Mittaustulokset ilmaisiprotootyypin reagoinnista sitä ohittavaan hiillockseen on esitetty kuvassa 27. Kanavien Ch0 – Ch3 mittaustulokset erottuvat selkeämmin liitteen 1 kuvassa 31, jossa samat tulokset on esitetty puolilogaritmisella asteikolla. Liitteen kuvasta 31 nähdään, että termiset anturit (Ch0 – Ch3) eivät tässä mittauksessa reagoi ohikulkevaan hiillockseen juuri mitenkään. Myöskään termopinoanturin kanavat Ch4 ja Ch5 eivät luotettavasti havaitse ohikulkevan hiillocksen lähettämää infrapunasäteilyä, vaikka kanavalla Ch4 on kertoimena 100 ja kanavalla Ch5 kertoimena 1100. Ainoa luotettava mittaustulos saadaan mittauskortin kanavilta Ch6 ja Ch7, joissa käytettiin kaistanpäästösuodatusta. Kanavien Ch6 ja Ch7 termopinoanturiosoiden optiikan edessä oli mittauksissa 2,8 μm kaistanpäästösuodattimet, kun taas kanavien Ch4 ja Ch5 termopino-osioissa ei käytetty mitään lisäsuodatusta.

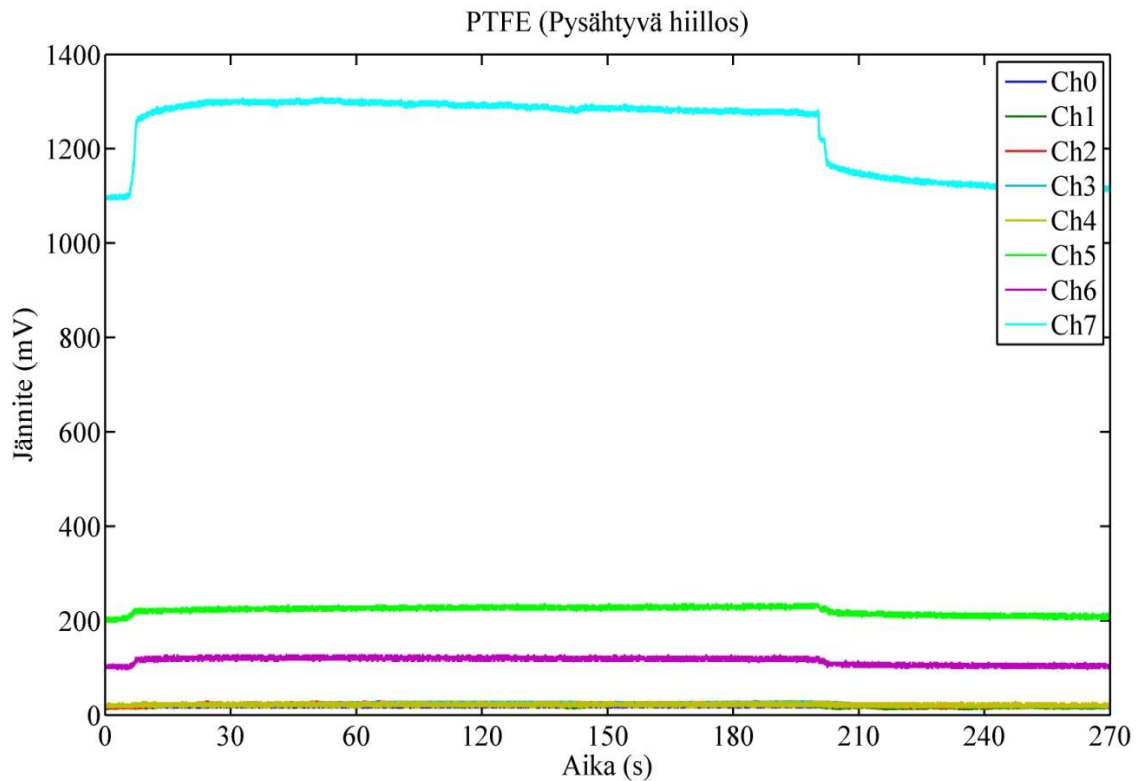
Kuvan 27 mittaustuloksista nähdään selkeästi mittauskanavien Ch6 ja Ch7 jännitesignaalien nousukohdat (noin 23 sekunnin kohdalla) hiiloksen ohittaessa ilmaisinprototyypin. Varsinkin kanavan Ch7 mittaustulos erottuu hyvin suuremman kertoimensa (1100) ansiosta.



Kuva 27. Linjailmaisinprototyypin jännitteet ajan funktiona liikkuvan ja kytevän palon testauksessa. Luotettava mittaustulos saadaan ainoastaan infrapunasäteilyä mittaavilta kanavilta Ch6 ja Ch7, joissa on käytetty 2,8 μm :n kaistanpäästösuodatusta.

Mittaussarjan kolmas mittaus oli muuten samanlainen kuin edellinen, mutta siinä kytevä ja liikkuva hiillos pysäytettiin radan keskikohtaan ilmaisinprototyypin kohdalle 180 sekunnin ajaksi, minkä jälkeen se jatkoi matkaansa 0,1 m/s nopeudella radan loppupäähän. Mittaustulokset ilmaisinprototyypin reagoinnista tähän liikkuvaan ja välillä pysähtyvään hiillockseen on esitetty kuvassa 28. Kanavien Ch0 – Ch3 mittaustulokset erottuvat selkeämmin liitteen 1 kuvassa 32, jossa samat tulokset on esitetty edellisten mittauskertojen tapaan puolilogaritmisella asteikolla. Liitteen 1 kuvan 32 mittaustuloksista nähdään, että termiset lämpötila-anturit kanavilla Ch1 – Ch3 reagoivat nyt pysähtyvään hiillockseen kohtuullisen selkeästi. Kuvan 28 mittaustulosten perusteella voidaan sanoa, että kanavalla Ch4 oleva termopino-osio ei edelleenkään reagoi luotettavasti, mutta kanavalla Ch5 oleva termopino-osio havaitsee pysähtyneen hiillocksen suuremman vahvistuskertoimensa (1100) ansiosta. Kanavien Ch6 ja Ch7 kaistanpäästösuodatetuilta termopino-osioilta saadaan tämän mittauskerran osalta selkeimmät mittaustulokset. Sekä kanavan Ch6 pienemmän vahvistuskertoimen (100) termopino-osion että kanavan Ch7 suuremman vahvistuskertoimen (1100) termopino-osion jännitesignaaleissa nähdään kuvan 28 mittaustuloksissa selkeät ylhäällä olokohtat 10 s – 200 s välillä. Lisäksi kana-

vien C6 ja Ch7 termopino-osioilta mitattujen infrapunasäteilyn intensiteettiin verrannollisten jännitteiden suuruudet vastaavat edellisen mittauskerran tuloksia, missä hiillos kulki ilmaisinprototyypin ohitse pysähtymättä.

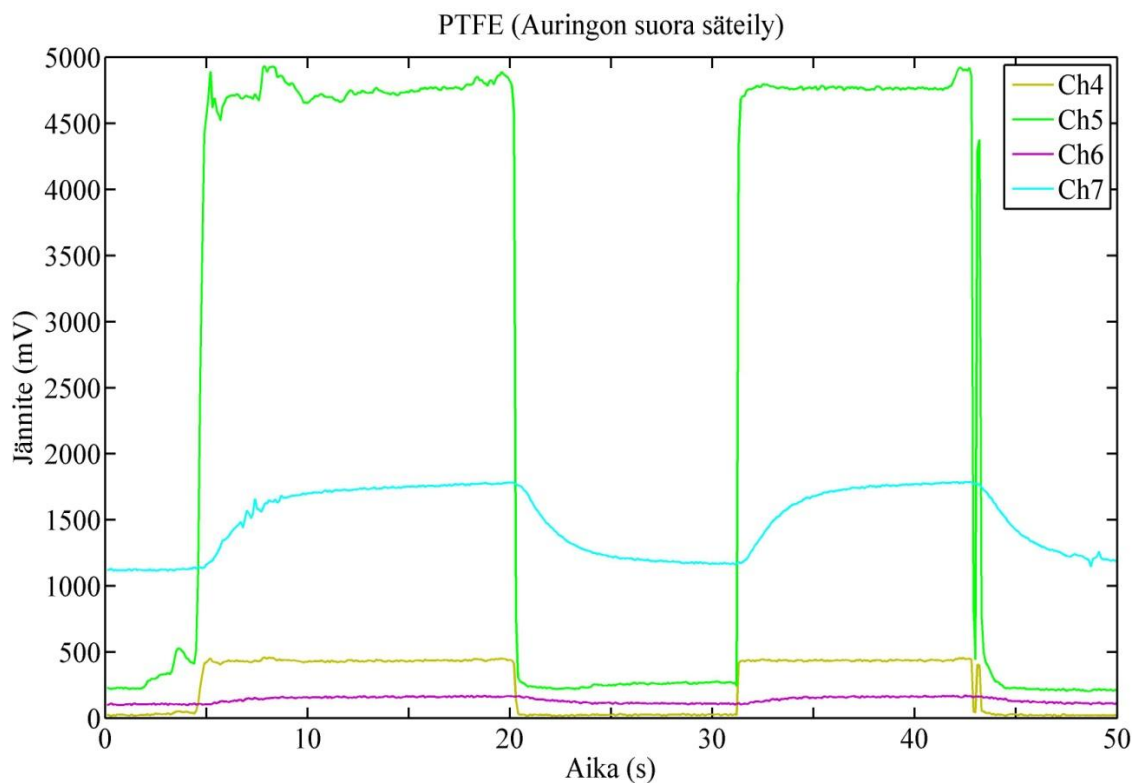


Kuva 28. Linjailmaisinprototyypin jännitteet ajan funktiona liikkuvan, kytevän ja kuljetin-radan keskikohtaan pysähtyvän palon testauksessa.

Kaikkien edellä esitettyjen mittausarjojen mittaukset tehtiin palokammiossa, mutta kolmannen mittausarjan viimeinen eli neljäs mittaus tehtiin auringon suoralle säteilylle. Auringon pinnan eli fotosfäärin säteilemä spektri on tunnetusti hyvin lähellä mustan kappaleen emittoimaa spektriä 5800 °C:een lämpötilassa. Koska kuumempi kappale säteilee energiaa kaikilla aallonpituusalueilla enemmän kuin sitä viileämmät kappaleet, on auringon säteily merkittävä ympäristöstä kytkeytyvä häiriölähde, joka pitää huomioida paloilmalaimen suunnittelussa.

Tässä auringon säteilylle tehdyssä mittauksessa ilmaisinprototyyppiin oli kytketty ainoastaan termopinoanturin neljä kanavaa Ch4, Ch5, Ch6 ja Ch7. Ilmaisinsprototyyppi kohdistettiin kaksi kertaa suoraan auringon säteilyyn ja siitä poispäin. Mittaustulokset prototyypin reagoinnista suoralle auringon säteilylle on esitetty kuvassa 29. Kuvan 29 mittaustuloksista nähdään, että koko infrapunasäteilyn kaistaa mittaavat termopinoanturin osiot kanavilla Ch4 ja Ch5 reagoivat voimakkaasti auringon suoralle säteilylle. Kanavilta mitattiin yhtä suuret säteilyn intensiteettiin verrannolliset jännitearvot kuin tämän mittausarjan ensimmäisessä mittauksessa, joka tehtiin liikkuvalla ja liekehtien palavalle N-heptaaniin ja tolueenin seokselle palokammiossa (kuva 26). Säteilyn intensiteettiä vastaavat jännitteet olivat kanavan Ch5 osalta noin 4700 mV molemmissa mittauksissa. Kaistanpäästösuodattimella varustetut termopino-osiot kanavilla Ch6 ja Ch7

antoivat puolestaan selkeästi pienemmät jännitteet auringon suoralle säteilylle verrattuna tämän mittaussarjan ensimmäiseen mittaukseen. N-heptaanin ja tolueeniseoksen palamisesta mitattua säteilyn intensiteettiä vastaava jännite ensimmäisessä mittauksessa oli kanavalla Ch7 noin 4700 mV, mutta auringosta mitattua säteilyn intensiteettiä vastaava jännite oli neljännessä mittauksessa kanavan Ch7 osalta noin 1700 mV. Tämä johtuu siitä, että auringon säteilystä ei ilmakehän hiilidioksidin ja vesihöyryn absorptioon vuoksi pääse maanpinnan tasolle aallonpituudeltaan lähellä $2,8\ \mu\text{m}$ olevaa infrapunasäteilyä, ainakaan merkittävästi. Tämä seikka antaa mahdollisuuden auringon säteilystä aiheutuvan häiriön eliminointiin ja erheellisten hälytysten minimointiin linjailmaisimen toiminnassa.



Kuva 29. Linjailmaisinprototyypin jännitteet ajan funktiona suoralle auringon säteilylle. Kanavilla Ch4 ja Ch5 on erilaiset vahvistuskertoimet ja kanavilla Ch6 ja Ch7 on $2,8\ \mu\text{m}$:n kaistanpäästösuoitus ja erilaiset vahvistuskertoimet.

Kolmannen mittaussarjan tulokset osoittavat, että linjailmaisinprototyyppi pystyy nelikanavaisen termopinoanturin ja $2,8\ \mu\text{m}$ kaistanpäästösuoituksen ansiosta luotettavasti havaitsemaan sekä liikkuvan että paikallaan pysyvän kytevän ja liekehtivän palon. Lisäksi ilmaisinprototyyppi pystyy erottamaan auringon säteilystä aiheutuvan häiriön todellisesta palosta ilmakehän aiheuttaman luonnollisen absorptioon (kaistanestosuodatuksen) ansiosta. Ilmakehän absorptiovaikutus on voimakkaampaa auringon säteilylle kuin todelliselle palolle, koska auringon säteen kulkema optinen matka on paljon pidempi, kuin paloilmasisimen normaali havainnointietäisyys.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Infrapunaoptiselle linjailmaisinkaapelille suunniteltu mittava ja haastava testaus- ja mittausteilteisto toimi tehdyissä palokokeissa odotusten mukaisesti, ja sen avulla saatiin tarvittavaa tietoa uudentyyppisten paloilmaisinten kehitystyöhön. Myös tiedonkeruuseen suunniteltu ohjelmisto toimi ongelmitta, ja testauksista saatu mittaustulodata saatiin tallennettua halutussa muodossa tulosten arviointia ja jatkokäsittelyä varten. Testaustulosten perusteella infrapunaoptisen linjailmaisimen kriittisimpään osaan eli suojavaippaan parhaiten soveltuvaksi suojavaippamateriaaliksi seuloutui PTFE. Palon ilmaisuuden kannalta tärkeät termiset ja optiset ominaisuudet suhteutettuna muihin paloilmaisimen suojavaipalta vaadittaviin ominaisuuksiin oli PTFE materiaalilla parhaat. Palokokeiden avulla saatiin myös selville, että platinavastus ja termopino lämpötila-anturit soveltuvat yhdistelmäilmaisuun hyvin, jos termopinoanturin reagointinopeus infrapunasäteilylle ja platinavastusanturin mittausturvallisuus ympäristön termisestä lämpötilasta yhdistetään. Termopinoanturille saapuvan 2,8 mikrometrin kaistanpäästösuodatetun säteilyn ja koko kaistalta saapuvan infrapunasäteilyn mittaustulosta voidaan lisäksi tunnistaa sekä kytevä, liekehtivä että liikkuva palo nopeasti. Ilmaisimen yhdistelmäilmaisuuteknikkaan pystytään saatujen mittaustulosten perusteella liittämään myös monikriteerisyys. Mittaustulosten antamien lämpötilaan ja infrapunasäteilyyn verrannollisten jännitesignaalien avulla voidaan ilmaisimen mikrokontrollerin ohjelmaan asettaa nyt empiirisesti testattu kriteeristö. Kriteeristön perusteella ilmaisimen lopullinen versio pystyy erottamaan oikeat palot ja palamisen eri vaiheet ympäristön häiriöistä, kuten esimerkiksi auringon valosta. Testaus- ja mittaustulosten perusteella kriteereiksi voidaan valita esimerkiksi antureiden antaman mittaussignaalin suuruus, nousunopeus ja kohina tai niiden yhdistelmiä, suhteita ja toiminta-alueita rajoituksineen.

Jokainen lämpötilamittauksen tulos näissä mittauksissa edustaa kuitenkin vain arviota mittaustulokkeen todellisesta lämpötilasta mittaushetkellä. Erilaisista mittaustulovirheistä johtuen täyttä varmuutta kohteen lämpötilan tarkasta arvosta ei näiden mittausten perusteella tiedetä, eikä se ollut tarkoituskaan. Lisähaasteen näihin mittauksiin asettikin juuri mittausten kohde, joka oli ilma. Ilman lämpötilan mittaustulot on erityisen vaikeaa, koska sen massa on hyvin pieni, joten se vaatii anturilta pientä aikavakiota. Aikavakio kuvaa nopeutta, jolla anturi pystyy seuraamaan ympäristön lämpötilaa, joten se riippuu anturin massasta ja sen kyvystä johtaa lämpöä. Tästä syystä antureiksi testauksiin valittiinkin vai sellaiset joiden tuntoelin oli massaltaan mahdollisimman pieni. Erinomaiseksi ilman lämpötila-anturiksi osoittautui mittauksissa käytetty termopari, jonka liittospäät oli hitsattu yhteen mahdollisimman pieneksi pisteeksi. Mittaustulokset edustavat kokonaisuudessaan kuitenkin keskiarvoa mittaustulosta, jotka saattavat poiketa toisistaan erisuu-

ruisten mittausvirheiden vuoksi. Mittausarvoihin on voinut vaikuttaa vakiosuuruinen eli systemaattinen virhe, joka ei ole muuttunut mittauksen aikana. Lisäksi niihin on voinut liittyä suhteellista virhettä, joka matalilla lämpötilan arvoilla on esiintynyt vain pienenä absoluuttisena virheenä, mutta suurilla lämpötilan arvoilla on saattanut aiheuttaa suurenkin absoluuttisen virheen. Nämä pyrittiin kuitenkin huomioimaan mahdollisimman hyvin mittausjärjestelyissä. Pienillä mittausvirheillä ei ole näissä mittauksissa juurikaan merkitystä, koska tarkoitus ei ole ollut mitata palamiseen liittyvää absoluuttista lämpötilaa, vaan siihen verrannollisia jännitesignaaleja, joiden aikakäyttäytymisestä voidaan tehdä johtopäätöksiä ja graafisia perusarviointeja. Mittaustuloksista voidaan kuitenkin kohtuudella sanoa että ne ovat luotettavia, koska mittauksia on toistettu useita kertoja.

LÄHTEET

- [1] Harris, R. Modern Physics. 2nd edition. Boston : Addison Wesley, 2007. p. 656.
- [2] Young, H.D. & Freedman, R.A. University Physics With Modern Physics. 12nd Edition. Boston : Addison Wesley, 2004. p. 1550.
- [3] Moderni fysiikka. Tilastollinen mekaniikka. Helsinki : Teknillinen korkeakoulu, 2007. s. 93. Luentomoniste.
- [4] Quinn, T.J. Temperature. London : Academic press, 1990. p. 495.
- [5] Napari, I. Termofysiikan perusteet. Helsinki : Helsingin yliopisto, 2008. s. 149.
- [6] Halttunen, J. Anturifysiikka. Tampere : Tampereen teknillinen yliopisto, 2008. s. 65. Luentomoniste.
- [7] Hemilä, S. & Utriainen, J. Lämpöoppi. Jyväskylä : Fysiikan Kustannus Oy, 1989. s. 189. ISBN 951-96117-2-X.
- [8] Merikoski, J. Termodynamiikka ja optiikka. Jyväskylä : Jyväskylän yliopiston Fysiikan laitos, 2008. s. 33.
- [9] Haug, E. & Sand, O. Ihmisen fysiologia. Porvoo : WSOY, 1992. s. 526. ISBN 951-0-19882-X.
- [10] Kollanus J., Myllykoski P. & Aaltonen K. Ruiskuvalumuotin suorituskyky. Espoo : Teknillinen korkeakoulu, 2002. s. 45. Teknillisen korkeakoulun Konepajateknillisen laboratorion julkaisuja. TKK-KPT-1/02.
- [11] Wallin, P. Sähkömittaustekniikan perusteet. Helsinki : Otatieto, 2001. s. 145.
- [12] Weckström, T. Lämpötilan mittaust. Helsinki : Mittatekniikan keskus, 2002. s. 101.
- [13] Seppä, H. & Lehto, A. Mikromekanismia antureita. Helsinki : Sanoma magazines, 1998. ss. 96-99. Prosessori lehti nro 3.
- [14] Lawrence D.J., Hearn S.L. & Taylor G.R. Thermal Sensor Microfabrication and Related Undergraduate Research Projects. Harrisonburg : James Madison University, 2003. p. 321. ISBN 0-7803-7972-1.

- [15] Halttunen, J. Mikroanturit. Tampere : Tampereen teknillinen yliopisto, 2002. s. 89. Luentomoniste.
- [16] Fonseca, L. & Santander, J. CNM contribution to GF. Centro Nacional de Microelectrónica, 2007. <http://www.imb-cnm.csic.es>. Viitattu: 22.01.2011.
- [17] Pastila, R., Nyberg, H. & Jokela, K. Säteil- ja ydinturvallisuus. Hämeenlinna : Säteilysturvakeskus, 2009. s. 318. ISBN: 978-951-712-502-4.
- [18] Read, H. F. Electromagnetic Radiation. San Francisco : John Wiley & Sons, 1980. p. 331.
- [19] Harris, R. Nonclassical Physics: Beyond Newtons view: Addison Wesley Publishing company, 1998. p. 545.
- [20] Pelastustoimi, Sisäasiain ministeriö. ERHE-vuosiraportti. 2009.
- [21] Drysdale, D. An Introduction to Fire Dynamics. 2nd Edition. San Francisco : John Wiley and Sons Ltd, 1998. p. 470.
- [22] Nyyssönen, T., Rajakko, J. & Keski-Rahkonen, O. Paloilmoitinlaitteistojen luotettavuus. Espoo : VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, 2005. s. 12.
- [23] Paloilmoitinjärjestelmät . Espoo : Sähkötieto ry, 2004. s. 232. 1. painos. ST-käsikirja 10.
- [24] Paloilmoittimen suunnittelu- ja asennusohje. 3. painos. Espoo : Sähkötieto ry, 2003. s. 29.
- [25] Tuomisaari, M. Konehuoneen sammutus- ja palonilmaisujärjestelmät. Espoo : VTT, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1996. s. 42.
- [26] Charles, E. & Baukal, Jr. Industrial Combustion Testing. Lontoo : CRC Press Taylor and Francis Group, LLC, 2011. p. 737. ISBN: 978-1-4200-8528-0.
- [27] Wolfe W.L. & Zissis G. J. The Infrared Handbook. Arlington : Office of Naval Research. Department of the Navy, 1978. p. 1720.
- [28] Melendez, J., De Castro, A., Aranda, J.S., Lerma, A. & Lopez, F. Infrared measurement devices. Principles and basic results. s.l. : Euro-Mediterranean Wildland Fire Laboratory, 2004. pp. 23.

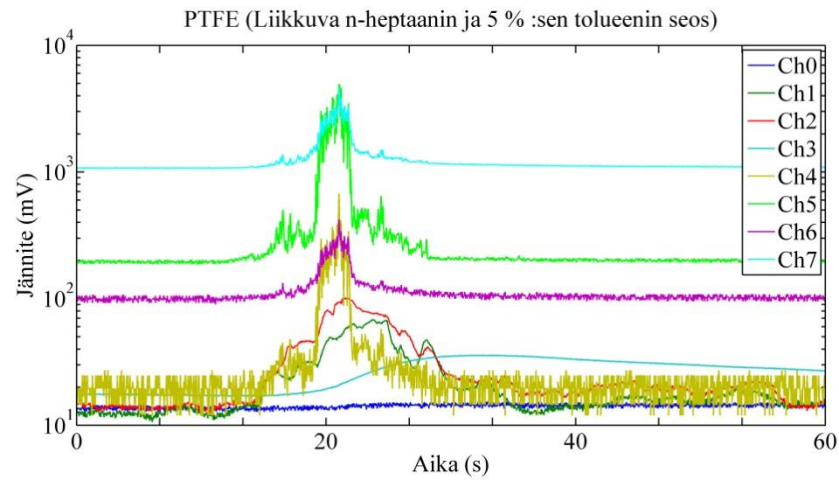
- [29] Aunela-Tapola, L. & Jormanainen, P. Päästömittausten laadunvarmistus. Päästöjen määrittelyn epävarmuuteen vaikuttavat tekijät. Kemiantekniikka. Espoo : Valtion teknillinen tutkimuskeskus VTT, 1996. s. 73. ISBN: 951-38-4994-5.
- [30] Jensen, J. R. Remote sensing of the environment: earth resource perspective. New Jersey : Prentice-Hall, 2000. p. 541.
- [31] Moskalenko, N. I., Zaripov, A. V. & Loktev, N. F. Emission characteristics of hydrogen-oxygen flames. 2010, Journal of Applied Spectroscopy, Vol.77, pp. 378-385.
- [32] HITRAN Database. Synthetic spectrum for gas mixture IAO model. Cambridge, Massachusetts, USA : Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics 2011.
- [33] Ray, B. Detection of fires and explosions, Bristol : IOP Publishing Ltd., 1978, Physics in Technology, Volume 9, pp. 231-272.
- [34] Laitalainen T. & Simonen T. Orgaaninen kvalitatiivinen analyysi, IR-analytiikka. Helsinki : VAPK, 1991. s. 81.
- [35] Jaarinen S. & Niiranen J. Laboratorion analyysitekniikka. 1. painos : Edita, 2005. s. 223.
- [36] Pfister, G. Fire Technology. : Springer, 1997. pp. 115-139.
Multisensor/multicriteria fire detection: A new trend rapidly becomes state of the art.
- [37] Hakkarainen, T. Talo- ja turvatekniikka tulipalotilanteessa. Espoo : VTT, 2007. s. 10.
- [38] Jämsä-Jounela, S. Prosessiautomaation perusteet. Helsinki : Teknillinen korkeakoulu, 2006. Luentomoniste.
- [39] Laurila, T. Materiaalitieteen perusteet. Espoo : Teknillinen korkeakoulu Elektroniikan laitos, 2009. s. 193.
- [40] Oy Fluorplast Ab. Materiaalit. Fluoromuovit, 2011.
<http://www.fluorplast.fi/index.php/fi/materiaalit>. Viitattu: 19.01.2011.
- [41] Mannila, J. & Nurmi V-P. Kylmälaitteiden lämmöneristemateriaalien palominaisuudet. Helsinki : TUKES, 2002. s. 82.

- [42] Ruuska, R. Räjähdysmäinen tulipalo terästehtaalla Torniossa 19.9.2003.
Helsinki : Sisäasiainministeriön Pelastusosaston Onnettomuustutkintakeskus,
2005. s. 24, Lausunto.

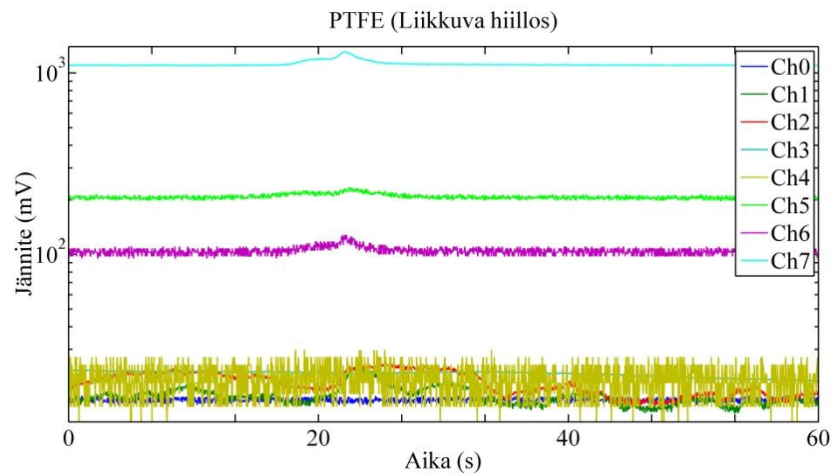
- [43] Galante, A.M.S., Galante, O.L. & Campos, L.L. Study on application of PTFE,
FEP and PFA fluoropolymers on radiation dosimetry. Sao Paulo : Nuclear
Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators,
Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2010. pp. 177-180. ISBN
0168-9002.

- [44] National Instruments. User guide and specifications. Austin, Texas, USA:
NI corporation, 2005. p 25

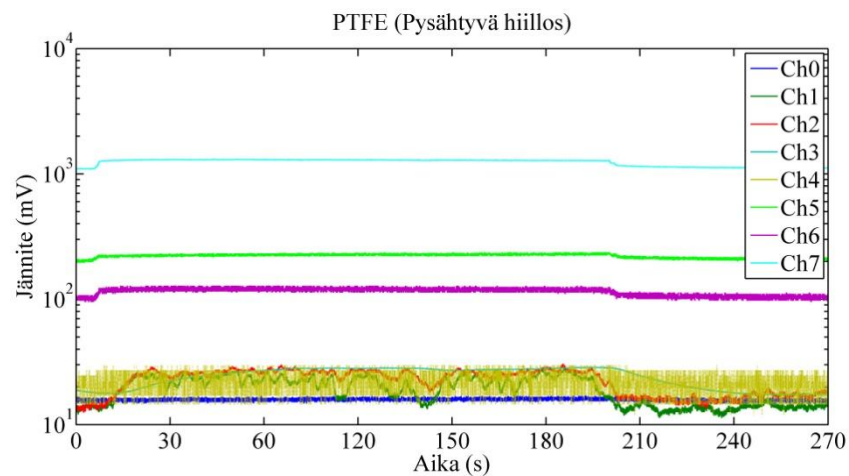
Liite 1: Kolmas mittaussarja



Kuva 30. Linjailmaisinprototyypin jännitteet (logaritminen asteikko) ajan funktiona, kun liekehtivä lämpölähde ohittaa sen nopeudella 0,1 m/s.



Kuva 31. Linjailmaisinprototyypin jännitteet (logaritminen asteikko) ajan funktiona, kun kytevä lämpölähde ohittaa sen nopeudella 0,1 m/s.



Kuva 32. Linjailmaisinprototyypin jännitteet (logaritminen asteikko) ajan funktiona, kun kytevä lämpölähde pysähtyy sen kohdalle nopeudesta 0,1 m/s noin kolmeksi minuutiksi, minkä jälkeen jatkaa matkaa samalla nopeudella.

Liite 2: Testauslomake

TESTAUSLOMAKE

Nimi: _____ Pvm: _____ Klo: _____ Ulkolämpötila: _____ °C

Näytteenottotaajuus: _____ Hz Tiedoston sijainti: C:\\TMP\\mittausdata .lvm

Ch GAIN OFFSET ANTURITYYPPI SIJAINTI KOORDINAATIT

°C

0	100	0	Termopari K-type	Lohko	X: _____ Y: _____ Z: _____
1	100	0	Termopari K-type	Poistoilmav.	X: _____ Y: _____ Z: _____
2	100	0	Termopari K-type	Testausteline	X: _____ Y: _____ Z: _____
3	20	0	Pt1000	Linjailmais	X: _____ Y: _____ Z: _____

TERMOPINO

VÄLIAINE

mV

4	100	0	Opt.Allpass G=100	_____	X: _____ Y: _____ Z: _____
5	1100	0	Opt.Allpass G=1100	_____	X: _____ Y: _____ Z: _____
6	100	0	Opt.2.8µm G=100	_____	X: _____ Y: _____ Z: _____
7	1100	0	Opt.2.8µm G=1100	_____	X: _____ Y: _____ Z: _____

Poltettava aine: _____

Määrä: _____ **Maljan koko:** ∅ _____ mm X: _____ Y: _____ Z: _____

Suojavaippamateriaali: _____ **sisäh./ulkoh:** _____ / _____ mm X: _____ Y: _____ Z: _____

Lohko: (2kW koko:4x45x40 cm) **Lämpötila:** _____ °C X: _____ Y: _____ Z: _____

Videokuvaus: _____ X: _____ Y: _____ Z: _____

Sammutin: _____

Huomioitavaa: _____